

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II



FACOLTA' DI MEDICINA E CHIRURGIA

TESI DI DOTTORATO DI RICERCA IN AMBIENTE, PREVENZIONE E
MEDICINA PUBBLICA XXVIII CICLO
INDIRIZZO SCIENZE BIOLOGICHE FORENSI

Analisi computerizzata morforugosimetrica di proiettili in ambito medico-legale: nuove metodiche di analisi balistiche comparative in particolari scenari forensi

COORDINATORE:
Chiar.mo Prof.
Claudio BUCCELLI

TUTOR:
Chiar.mo Prof.
Massimo NIOLA

CANDIDATO:
Dott. Emanuele CAPASSO

ANNO ACCADEMICO 2014-2015

INDICE

Premessa	2
Introduzione	4
I. Entità del fenomeno lesività da armi da fuoco	9
II. Inquadramento nosografico	11
1. Nozione e classificazione giuridica delle armi	11
2. Armi da sparo	15
3. Armi da fuoco individuali o leggere o portatili.....	18
4. Cenni su caratteristiche tecnico-costruttive delle armi leggere	24
5. Munizionamento	40
6. Nozioni di balistica	45
III. L'indagine balistica	49
1. Il sopralluogo giudiziario	49
2. L'identificazione dei reperti balistici	54
3. Lo stato dell'arte ed il sistema I.B.I.S.	64
IV. Esperienza condotta	70
1. Conclusioni	94
2. Appendice	98

PREMESSA

Lo studio dei reperti balistici (proiettile e bossolo) finalizzato all'identificazione dell'arma da sparo è strutturato sull'analisi delle modificazioni di forma e superficie subite nel corso delle diverse fasi della balistica (interna, esterna e terminale).

L'inquadramento nosografico, pertanto, non dovrebbe prescindere dalla illustrazione di ogni fattore, di ordine balistico e relativo alle caratteristiche tecnico-costruttive delle armi nonché del munizionamento, in grado di provocare dette modificazioni.

Va, però, considerato che le modificazioni subite dal proiettile sia nella fase intermedia che terminale della balistica rappresentano interferenze nell'analisi identificativa dell'arma, poiché non correlate all'azione di essa sola.

Lo scopo accademico dell'attuale trattazione consente di circoscrivere l'inquadramento nosografico alle informazioni concernenti aspetti relativi

alla balistica iniziale ed alle caratteristiche tecnico-costruttive delle armi, soprattutto per ciò che concerne parti metalliche che vengono a contatto con il proiettile ed il bossolo perché, si ripete, le sole rilevanti ai fini dell'identificazione dell'arma da sparo.

INTRODUZIONE

Il possesso, legale o illegale, di armi da fuoco è un fenomeno molto diffuso.

Le armi da fuoco portatili rappresentano il mezzo lesivo maggiormente utilizzato negli omicidi, frequentemente impiegato nei suicidi, spesso foriero di disgrazie, per la loro maneggevolezza e semplicità di impiego.

Il loro utilizzo determina elevati costi per la società in relazione alle conseguenze letali o invalidanti e per l'impegno profuso da parte degli organi di Giustizia deputati alle indagini connesse al loro uso in contesti criminosi.

Pertanto, diverse discipline (giuridica, medico-legale, tecnico-ingegneristica, sociologica-epidemiologica) hanno posto attenzione sul fenomeno.

Il medico frequentemente si trova di fronte a problematiche legate all'utilizzo delle armi da fuoco, in quanto interviene sugli effetti lesivi nel campo della balistica terminale.

In particolare, l'osservazione del medico-legale, nel corso della sua attività di consulenza condotta per fini giudiziari, di lesioni o postumi di lesioni d'arma da fuoco è orientata anche a stabilire il tipo di arma che possa averle determinate, la distanza dello sparo, la posizione relativa tra sparatore e sparato, il tramite, ecc.; pertanto tale osservazione non può che strutturarsi su adeguate conoscenze specialistiche di ordine balistico.

Di frequente il medico legale, durante l'esame del cadavere, reperta proiettili, fondamentali elementi balistici di prova.

In un laboratorio di scienze forensi, le analisi finalizzate alla identificazione dell'arma da sparo mediante studio del proiettile rinvenuto si giovano anche dell'esperienza del medico legale il quale, oltre a partecipare in prima persona alle analisi balistiche, può svolgere il ruolo di responsabile

del coordinamento e della integrazione sinergica degli apporti di conoscenze scientifiche provenienti da differenti professionalità al fine di pervenire ad un giudizio quanto più assoluto possibile in termini di affidabilità.

In campo medico-legale le esperienze di analisi dei proiettili ai fini identificativi dell'arma da sparo non sono numerose; il lavoro svolto durante il dottorato di ricerca presso la Sezione di Balistica Forense del Dipartimento di Scienze Biomediche Avanzate dell'Università Federico II, si inserisce in questo contesto specialistico appannaggio soprattutto di professionalità tecnico-ingegneristiche delle cui competenze si è, comunque, fruito attraverso l'afferenza al Dipartimento di Ingegneria Meccanica della medesima Università.

La nostra linea di ricerca si propone di superare i limiti di attendibilità delle metodiche identificative dell'arma da sparo basate sulla osservazione diretta da parte degli operatori e legate, quindi, alla soggettività di lettura, tenuto conto che è fortemente sentita la necessità di pervenire ad un giudizio

diagnostico oggettivo in termini di esclusione, compatibilità o qualificata probabilità mediante applicazione di metodologie scientifiche basate sullo studio analitico dei dati.

Negli ultimi anni la comunità scientifica internazionale si è interrogata sul valore giuridico delle indagini balistiche effettuate a fini identificativi, soprattutto in relazione ad armi di ultima generazione prodotte mediante il ricorso a tecnologie sofisticate che rendono meno evidenti e distinguibili i tratti morfologici caratteristici abitualmente impiegati in balistica identificativa.

I sistemi di identificazione balistica in commercio che rappresentano lo stato dell'arte in uso alle maggiori forze di Polizia mondiali presentano limiti in quanto, sebbene strutturati su metodiche informatizzate, non escludono del tutto il ricorso ad osservazione diretta da parte degli operatori nella formulazione del giudizio finale, nonché limiti di risoluzione in rapporto alla possibilità di effettuare analisi sulle armi da fuoco moderne.

L'ultima fase del lavoro, svolta attraverso la collaborazione tra il nostro Dipartimento ed il Servizio di Polizia Scientifica della Polizia di Stato di Roma, ha avuto come obiettivo la messa a punto di una metodica identificativa estremamente avanzata sotto il profilo matematico-tecnologico, volta a superare le emergenti difficoltà in ambito di balistica forense.

ENTITA' DEL FENOMENO LESIVITA' DA ARMI DA FUOCO

Si stima che nel mondo siano detenuti circa 875 milioni di armi da fuoco piccole e leggere (pistole e revolver, fucili da caccia e ad uso sportivo), delle quali il 75% circa (650 milioni) siano in possesso di civili¹.

Ogni anno circa 526.000 persone vengono uccise da queste armi, e circa l'80% di esse perde la vita al di fuori di scenari bellici (per omicidi, suicidi, esecuzioni extragiudiziali, violenza di genere, sparizioni forzate, rapimenti)².

Nel 2012, negli Stati Uniti, sono state concesse 130.956 licenze federali per armi da fuoco³ e sono stati registrati 33.563 decessi correlati all'impiego di tali armi, dei quali il 61,6% erano suicidi ed il 34,6% omicidi⁴.

¹ Lamanna A., Armi leggere, guerre pesanti: rapporto 2015, Periodico Mensile dell'Istituto di Ricerche Internazionali Archivio Disarmo (IRIAD), n. 4/2015, pagg. 3-51, Roma, 2015

² *Op. cit.* sub 1

³ Firearms Commerce in the United States Annual Statistical Update 2013. United States Department of Justice Bureau of Alcohol, Tobacco, Firearms Bureau of Alcohol, Tobacco, Firearms and Explosives

⁴ Murphy SL, Kochanek KD, Xu JQ, Heron M. Deaths: Final data for 2012. National vital statistics reports; vol 63 no 9. Hyattsville, MD: National Center for Health Statistics. 2015

Negli ultimi 40 anni le armi portatili hanno determinato un numero di morti maggiore di quello di tutte le guerre del secolo scorso.

In Italia, nel 2012, un omicidio su due (49,9%) è stato commesso mediante l'impiego di armi da fuoco, registrandosi una crescita del fenomeno rispetto al 42,9% del 2011.⁵

La Campania, nel 2012, con 90 omicidi, è stata la regione italiana con il maggior numero di delitti (17,1% del totale nazionale), ed ha visto un significativo aumento rispetto all'anno precedente (+47,5%) in cui si sono registrati 61 casi.⁶

⁵ L'omicidio volontario in Italia. Rapporto EURES 2013

⁶ *Op. cit.* sub 5

NOZIONE E CLASSIFICAZIONE GIURIDICA DELLE ARMI

Per arma si intende un oggetto che, per destinazione specifica (arma propria) o per modalità di impiego (arma impropria), aumenta in senso offensivo le potenzialità fisiche dell'uomo.

In pratica, le armi improprie sono oggetti usati per ledere, originariamente non destinati a tale scopo.

Nel campo degli armamenti bellici le armi si classificano in base al bersaglio verso cui il loro uso è indirizzato, per questo motivo vengono distinte come antiuomo ("bersaglio tenero" o "soft-target") o idonee a colpire manufatti e mezzi di protezione dell'uomo ("bersaglio duro" o "hard-target")⁷.

Gli "aggressivi" ("**armi proprie**") possono essere classificati in:

⁷ Ugolini A.: L'esperto balistico. Editoriale Olimpia, Firenze, 1983

a) bianche: da punta, da taglio, da punta e taglio (spada, pugnale, stiletto, ecc.), da fendente, da colpo, da lancio o getto (lancia, arco, etc.), ecc.;

b) da fuoco (pistola, fucile, ecc.);

c) nucleari;

d) chimiche;

e) biologiche;

f) fisiche (basate sull'utilizzo di energia elettrica, sonora, vibratoria, ecc.);

g) insidiose: trabocchetti, trappole, antiuomo o antimateriale, ecc.;

h) miste.

Nella categoria delle "**armi improprie**" rientrano cacciaviti, mazze, tubi, catene, bulloni, le sfere metalliche, taglia carte, ecc.

La **definizione giuridica** di arma scaturisce dal combinato disposto delle norme del C.P. (artt. 585 e 704), del t.u.l.p.s. (Testo Unico delle Leggi di Pubblica Sicurezza) (art.30), della legislazione vigente in materia (in particolare L. 18 aprile 1975, n. 110 e successive modificazioni e integrazioni).

Per armi si intendono:

1. quelle da sparo e tutte le altre la cui destinazione naturale è l'offesa della persona (armi proprie);
2. tutti gli strumenti atti ad offendere dei quali è dalla legge vietato il porto in modo assoluto, ovvero senza giustificato motivo;
3. le materie esplodenti ed i gas asfissianti o accecanti, in quanto espressamente assimilati;
4. le bombe, qualsiasi macchina o involucro contenente materie esplodenti e i gas asfissianti o accecanti⁸.

⁸ <http://www.carabinieri.it/cittadino/consigli/tematici/giorno-per-giorno/armi/classificazione> consultato nel febbraio del 2016

Sono definite **armi comuni non da sparo**⁹:

- le armi bianche: strumenti da punta o da taglio (pugnali, baionette, coltelli, spade);
- gli strumenti per i quali sussiste un divieto assoluto di porto (mazze ferrate, bastoni ferrati, sfollagente, noccoliere);
- bastoni animati.

⁹ Art. 4, 1° comma, Legge 110/75

ARMI DA SPARO

Manuali militari riportano le seguenti definizioni di arma da fuoco:

a) *“Macchina termo-balistica capace di lanciare un corpo pesante (il proietto) destinato ad offendere, neutralizzare, oppure ad arrecare specifici effetti ad un bersaglio posto a distanza, utilizzando la forza espansiva dei gas prodotti dalla trasformazione di una sostanza esplosiva (carica di lancio o propellente) fatta esplodere all’interno di un tubo resistente (canna o bocca dell’arma da fuoco oppure cannello del razzo)”¹⁰.*

b) *“Congegni meccanici che utilizzano la forza espansiva dei gas prodotti dalla combustione rapida di una sostanza esplosiva detta carica*

¹⁰ Op. cit. sub 7

di lancio, per lanciare a distanza proiettili destinati a produrre su di un bersaglio determinati effetti”¹¹.

Una nostra proposta definitoria è la seguente:

L’arma da fuoco è una macchina termo-balistica in grado di lanciare, per forza di spinta esercitata dalla combustione rapida ed esplosiva di un propellente (carica di lancio), un corpo solido (proiettile) all’interno di un tubo resistente (canna dell’arma da fuoco).

Le armi da fuoco a seconda della loro adattabilità di impiego possono essere distinte in:

- a) individuali o leggere o portatili;
- b) mobili o medie o di gruppo;
- c) pesanti o da postazione.

¹¹ Comando Generale dell’Arma dei Carabinieri: Le attività dello stato militare. Disposizioni sulle armi. Cruciani snc, 1997

Lo studio delle armi da fuoco leggere riveste maggiore interesse perché il loro possesso è estremamente diffuso nella popolazione e il loro impiego è spesso a scopo omicidiario.

ARMI DA FUOCO INDIVIDUALI O LEGGERE O PORTATILI

Le armi da fuoco individuali possono essere impiegate da un solo uomo, poiché sono agevolmente trasportabili (per limitato peso, minimo ingombro, facile alloggiamento in fodero oppure in tasca), producono scarse sollecitazioni sul tiratore e sono di facile utilizzo.

Esse sono caratterizzate da breve gittata.

In tab. 1 sono riportate le **armi comuni da sparo**¹².

fucili	carabine	moschetti
rivoltelle	pistole	repliche di armi antiche ad avancarica di modelli anteriori al 1890
armi denominate "da bersaglio da sala" o ad emissione di gas	armi ad aria compressa	lanciarazzi*

Tab.1: Armi comuni da sparo secondo l'art. 2, 1° comma, legge 110/75

* Salvo che si tratti di armi destinate alla pesca ovvero di armi e strumenti per i quali la Commissione consultiva di cui all'art. 6, comma 1 della legge 110/75 escluda, in relazione alle rispettive caratteristiche, l'attitudine a recare offesa alla persona.

Le armi da fuoco individuali o leggere si possono dividere¹³, a seconda della lunghezza della canna e del loro ingombro, in:

¹² Art. 2, 1° comma, legge 110/75

a) corte: revolver e pistole (semi e automatiche);

b) medie: mitra, fucili-pistole, armi manomesse (scrocchi, mozzette, ecc...);

c) lunghe: fucili, moschetti, carabine, ecc....

Le armi da fuoco leggere a seconda del loro utilizzo possono essere distinte in (tab. 2) :

da guerra	da difesa	da caccia
da sport (tiro)	da segnalazione	da fantasia

Tab. 2: Classificazione delle armi da fuoco leggere secondo il loro utilizzo

Le armi **da guerra** sono: “le armi di ogni specie che, per la loro spiccata potenzialità di offesa, sono o possono essere destinate al moderno armamento delle truppe nazionali o estere per l’impiego bellico, nonché le bombe di qualsiasi tipo o parti di esse, gli aggressivi

¹³ *Op. cit.* sub 7

chimici, i congegni bellici micidiali di qualunque natura, le bottiglie e involucri esplosivi o incendiari”¹⁴.

Sono, invece, **armi tipo guerra** “quelle che, pur non rientrando tra le armi da guerra, possono utilizzare lo stesso munizionamento delle armi da guerra o sono predisposte al funzionamento automatico per l'esecuzione del tiro a raffica o presentano delle caratteristiche balistiche o di impiego comuni con le armi da guerra”¹⁵.

Le armi da sparo **da difesa** “personale” sono quelle impiegate per scongiurare una minaccia attuale in maniera proporzionale alla minaccia stessa esercitata da parte di un terzo¹⁶.

Le armi **da caccia** servono per catturare od appropriarsi di animali altrimenti non raggiungibili con altri mezzi (eccetto trappole e

¹⁴ Art. 1, 1° comma, legge 110/75

¹⁵ Art. 1, 2° comma, legge 110/75

¹⁶ *Op. cit.* sub 7

trabocchetti) per servirsi di loro a fini alimentari, di trofeo, collezionistici, di difesa¹⁷.

Nell'uso **sportivo** o **ludico** delle armi da fuoco il bersaglio, eccetto il tiro al volatile, è simbolico e costituito da un pezzo di cartone o un oggetto mobile⁶.

Si considerano armi per uso sportivo quelle¹⁸:

1) riconosciute “[...] dal Ministero dell'Interno, su conforme parere della Commissione consultiva centrale delle armi [...]”;

2) “[...] sia lunghe sia corte che, per le loro caratteristiche strutturali e meccaniche, si prestano esclusivamente allo specifico impiego nelle attività sportive”.

Le armi da sparo **da segnalazione** lanciano bengala od ordigni fumogeni o scoppianti, per indicare, segnalare, avvisare in lontananza oppure per illuminare zone¹⁹.

¹⁷ *Op. cit.* sub 7

¹⁸ Legge 25 marzo 1986, n. 85

Le armi da sparo **da fantasia**, pur presentando caratteristiche particolari (meccaniche o balistiche) non omologabili con altre categorie, restano idonee ad arrecare nocumento alla persona²⁰.

I **giocattoli riproducenti armi**²¹ “non possono essere fabbricati con l'impiego di tecniche e di materiali che ne consentano la trasformazione in armi da guerra o comuni da sparo o che consentano l'utilizzo del relativo munizionamento o il lancio di oggetti idonei all'offesa della persona. Devono inoltre avere l'estremità della canna totalmente occlusa da un visibile **tappo rosso** incorporato”²².

Le armi da fuoco individuali possono essere caratterizzate da un'anima liscia o rigata.

In un'arma da fuoco individuale, di norma, si possono definire varie parti che nel loro insieme costituiscono l'arma funzionante.

¹⁹ *Op. cit.* sub 7

²⁰ *Op. cit.* sub 7

²¹ Art. 5, 1° comma, legge 110/75

²² Legge 21 febbraio 1990 n. 36

In genere un'arma da sparo è composta dalla canna, dal castello di culatta (contenente il congegno di chiusura), dal sistema di scatto, dal sistema di percussione, dal sistema di estrazione ed espulsione del bossolo sparato, dal sistema di alimentazione, dal sistema di puntamento, da una cassa o calcio, da eventuali accessori.

CENNI SU CARATTERISTICHE TECNICO-COSTRUTTIVE DELLE ARMI LEGGERE

Le armi da fuoco, dal punto di vista tecnico-costruttivo, sono costituite da diversi elementi^{23,24,25,26}:

- a) la canna;
- b) il castello;
- c) il congegno di chiusura;
- d) il congegno di sparo;
- e) l'estrattore;
- f) l'espulsore;
- g) il congegno di alimentazione;
- h) la cassa e l'impugnatura.

Si riportano di seguito le caratteristiche principali di alcuni elementi costitutivi delle armi da fuoco e di alcuni dispositivi accessori,

²³ *Op. cit.* sub 7

²⁴ Puopolo G., Armi da fuoco e tiro per difesa personale, Luigi Panella Editore, 1990

²⁵ De Florentis G.: Tecnologia delle armi da fuoco portatili, Editore Ulrico Hoepli, Milano, 1991

²⁶ Bianchi L.: Armi da fuoco leggere, L'Airone Editrice, Roma, 1998

rilevanti ai fini della presente trattazione, poiché produttivi di segni caratteristici sulla superficie di proiettili e bossoli che vengono abitualmente impiegati per l'identificazione dell'arma da sparo.

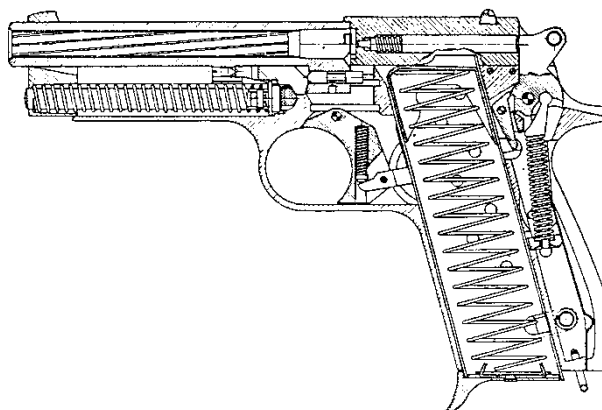


Fig. 1: Esempio di pistola

(da Ugolini A.: *L'esperto balistico*. Editoriale Olimpia, Firenze, 1983)

Canna

E' un tubo generalmente metallico (acciaio legato e trattato),
avente forma esterna cilindrica o prismatica, con due fori alle estremità.

La canna può montare congegni ausiliari quali compensatori al
vivo di volata, strozzatori variabili, spegnifiamma, silenziatori,
smorzatori di rinculo ecc.

Nelle armi lunghe la canna può essere fissa o mobile a seconda se vincolata con la culatta o meno.

Le funzioni della canna sono quelle di: a) contenere la cartuccia, durante lo sparo; b) fungere da camera di compressione a volume variabile durante la deflagrazione del propellente; c) dirigere il proiettile durante l'accelerazione impulsiva; d) stabilizzare il proiettile giroscopicamente (in caso di anima rigata) al fine di proiettarlo verso un bersaglio.

Le estremità della canna sono rappresentate dal vivo di culatta (prossimale), piano di appoggio in chiusura della testa dell'otturatore, e dal vivo di volata (distale), piano attraverso il quale fuoriesce il proiettile.

Elementi strutturali della canna sono, in senso prossimo-distale:

- ***culatta***: parte posteriore in cui si introduce la cartuccia;

- **camera della cartuccia**: sede di alloggiamento della cartuccia che comprende le camere del bossolo (di diametro maggiore) e del proiettile (di diametro minore); non presenta rigatura e perciò è anche detta *free-boring*.

I revolver nel tamburo alloggiano i colpi in singole camere di scoppio.

- **anima**: parte cilindrica interna percorsa dal proiettile a superficie rigata o liscia, con eventuali fori di sfogo di gas.

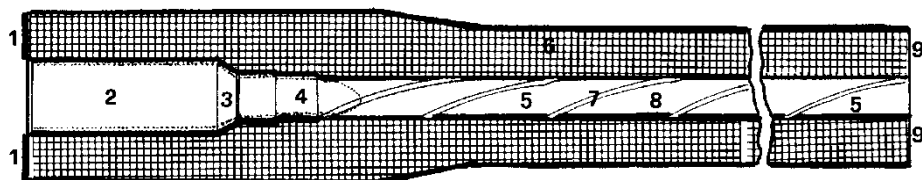


Fig. 2: Sezione longitudinale di una canna rigata: 1) vivo di culatta; 2) camera del bossolo; 3) raccordo o spalla della camera del bossolo; 4) camera del proiettile; 5) anima della canna; 6) corpo della canna; 7) pieno o nervatura dell'anima rigata; 8) solco o cavo dell'anima rigata; 9) vivo di volata.

(da Ugolini A.: *L'esperto balistico*. Editoriale Olimpia, Firenze, 1983)

L'anima rigata presenta creste in rilievo (pieni o nervature della rigatura) e solchi (vuoti o cavi della rigatura) ad andamento elicoidale.

Sia i pieni che i solchi presentano caratteristiche peculiari per ogni casa produttrice e, talvolta, per ogni modello e calibro.

Tali caratteristiche relative ai pieni ed ai solchi delle rigatura, sono: numero, verso o direzione (che può essere destrorso o orario e sinistrorso o antiorario), dimensioni, angolo di inclinazione inteso come angolo con la generatrice.

Il numero dei pieni e dei vuoti varia da 2 a più di 20; di solito è 6.

La maggior parte delle aziende produttrici fabbrica armi con rigatura destrorsa.

La rigatura serve ad imprimere un movimento di rotazione al proiettile sul proprio asse maggiore durante il passaggio nella canna al fine di aumentarne, grazie all'effetto giroscopico, la stabilità e diminuirne la possibilità di deviazioni dalla propria traiettoria.

Il passo della rigatura è la distanza, espressa in centimetri o in pollici, che copre un proiettile all'interno dell'anima per compiere un giro completo sul proprio asse longitudinale.

Per effetto della rigatura della canna, si formano sulla superficie del proiettile durante il passaggio al suo interno, le impronte della rigatura stessa.

L'impronta cava sul proiettile che progressivamente avanza nella canna fa da "binario", impedendo lo scavalcamento delle nervature ad andamento elicoidale, in modo da imprimere un movimento di rotazione sull'asse longitudinale del proiettile stesso.

Per calibro balistico si intende il diametro dell'anima misurato tra due pieni, mentre il calibro effettivo è misurato tra due cavi opposti, corrisponde al diametro maggiore dell'anima e al diametro del proiettile recuperato dopo lo sparo.

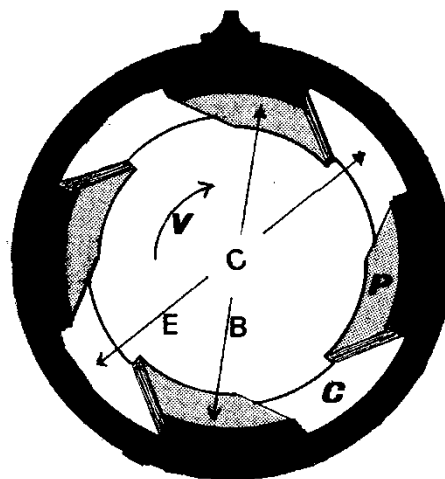


Fig. 3: Schema di anima rigata: P indica i pieni della rigatura; C indica i cavi; V è il verso della rigatura; CE è il calibre effettivo (ai cavi); CB è il calibre balistico (diametro di foratura della canna). (da Ugolini A.: *L'esperto balistico*. Editoriale Olimpia, Firenze, 1983)

Il calibre commerciale è, invece, convenzionale poiché riferito alla cartuccia.

CALIBRO	DIAMETRO (mm)
12	18,30
16	17
20	15,80
24	14,90
28	14,20
32	12,95

Tab. 3: Rapporto tra calibre e diametro delle munizioni da arma da fuoco. (da Gerin C.: *Medicina Legale e delle Assicurazioni*. Ed. Schirru, 1977)

Il calibre delle armi ad anima liscia viene espresso con un numero che rappresenta quello delle palle di piombo puro aventi il diametro della

canna il cui insieme pesa una libbra inglese; pertanto maggiore è il calibro, minore è il diametro della canna.

Tale sistema di classificazione viene impiegato sin dall'epoca in cui si costruivano fucili a calibro non perfettamente standardizzato.

Castello

Il castello o fusto, detto impropriamente culatta o propriamente “castello di culatta”, rappresenta l'elemento centrale dell'arma da fuoco e costituisce il corpo metallico che unisce i congegni necessari al funzionamento della stessa.

Nella armi corte ha anche funzione di supporto per l'impugnatura.

Congegno di chiusura (otturatore)

L'otturatore è il congegno che permette la tenuta, specie durante lo sparo, del bossolo nella camera di scoppio della canna ed impedisce o rende minime le dissipazioni energetiche e di gas a posteriori.

Esso presenta una superficie che entra in contatto con il fondello del bossolo.

La modalità di chiusura del congegno di otturazione può essere differente a seconda del tipo di arma e può essere:

a) *fissa*, se l'otturatore può sbloccarsi e muoversi solo a seguito di azione manuale del tiratore (*chiusura geometrica fissa manuale*);

b) *stabile*, se l'otturatore può sbloccarsi e muoversi solo a seguito di azione meccanica combinata e comandata, per effetto di un sistema che può essere messo in moto dalla sottrazione di gas attraverso un foro sulla canna che aziona un pistoncino che, a sua volta, trasmette il suo movimento ad una serie di leve che liberano l'otturatore (*chiusura geometrica stabile o assoluta automatica*);

c) *metastabile*, se l'otturatore, pur bloccato, si muove da solo dopo un intervallo di tempo (*esitation*) scaturito dall'effetto di una serie di leve e congegni che frazionano i momenti inerziali dell'otturatore, sotto l'impul-

so dei gas sul fondello oppure per rinculo (*chiusura metastabile automatica*);

d) *labile*, se l'otturatore non è vincolato ma libero di rinculare e la chiusura avviene per effetto della molla o di un sistema di molle di recupero che contrastano il suo moto retrogrado.

Congegno di sparo

Determina la percussione della capsula ed è costituito dagli apparati di:

- a) armamento;
- b) scatto;
- c) percussione.

Per armamento si intende la fase di immagazzinamento di energia che viene successivamente restituita durante la fase di percussione, mediante un sistema di molle azionato da uno svincolo.

L'apparato di scatto è costituito dal *grilletto*, dalla *leva di sgancio del percussore* (detta anche *di svincolo*), e da *molle* di ritorno che, riportano la leva di sgancio alla posizione iniziale.

Nelle armi a ripetizione manuale, l'armamento del percussore avviene manualmente o attraverso l'apertura e chiusura dell'otturatore oppure mediante manovra di armamento di un cane.

Nelle armi a ripetizione automatica la sequenza è automatica e si ripete ciclicamente finché perdura la pressione del dito sul grilletto.

Nelle armi semiautomatiche l'aggancio è automatico ad ogni sequenza, ma ad ogni azione sul grilletto corrisponde l'esplosione di un singolo colpo.

L'apparato di percussione è in genere composto da una "massa battente" ("cane" se è separata), da un'asta la quale agisce battendo sulla capsula e da una molla.

Il sistema di percussione può essere *per lancio* (se il percussore avanza percuotendo la capsula sotto la spinta di una molla o di una leva), *per battuta* (se il percussore avanza dopo essere stato a sua volta sospinto da una massa battente), *diretto* (se è la stessa massa stessa che, avanzando, percuote la capsula).

Congegni di estrazione ed espulsione del bossolo

Dopo lo sparo di ogni colpo, il bossolo deve essere estratto dalla camera di scoppio ed espulso dal castello al fine di consentire il caricamento di una nuova munizione.

L'estrazione avviene attraverso l'effetto di una superficie fissa o mobile del castello, dell'otturatore o del caricatore contro il bordo del fondello del bossolo esploso oppure in conseguenza della pressione dei gas, determinando l'espulsione del bossolo stesso, che avviene lateralmente, di solito a destra.

L'estrattore aggancia il bossolo a livello del collarino mediante un'estremità a gancio, a unghia o a leva.

L'espulsore abitualmente è situato sul castello, sulla testa dell'otturatore oppure sul carrello e non è presente nelle armi in cui l'estrazione avviene per caduta oppure all'interno del nastro di caricamento.

Congegno di alimentazione

Il congegno di alimentazione è caratteristico delle armi a ripetizione.

Attraverso un movimento di apertura e chiusura dell'otturatore, detto congegno ricarica l'arma, prelevando una cartuccia alla volta dal serbatoio.

I serbatoi di cartucce possono essere parte integrante fissa dell'arma oppure mobili ed asportabili.

Cassa ed impugnatura

Le armi portatili, in base alla modalità in cui vengono impiegate durante lo sparo, possono essere classificate in:

- a) da pugno;*
- b) da fianco;*
- c) da spalla.*

La cassa (in legno, metallo o materiale sintetico, fornita o meno di intelaiatura di rinforzo interno) può essere distinta in:

- *fusto*: parte anteriore, inferiore o avvolgente la canna;
- *impugnatura*: parte ove trova salda presa la mano;
- *calcio*: parte che poggia sulla spalla (nelle armi corte l'impugnatura ed il calcio si identificano).

Riduttori e conversioni di calibro per armi da fuoco

Il riduttore consente di impiegare cartucce di dimensioni ridotte, vale a dire con proiettili dello stesso diametro, ma con munizioni più piccole.

Talvolta il ricorso al riduttore ha il fine di depistare le indagini balistiche identificative.

Il riduttore funge da “falso bossolo” su cui avviene la percussione ed in cui viene inserita la cartuccia più corta e sottile.

Silenziatori per armi da fuoco

Il silenziatore riduce il rumore prodotto a seguito dello sparo, impedendo il violento contatto dei gas con l'aria atmosferica moderando la reazione detonante, l'urto dei gas incombustibili ed il ritorno dell'aria dentro la canna.

I sistemi usati per silenziare un'arma sono:

- a) *a trappola di gas*: una serie di separatori e diaframmi adeguati al calibro usato, disposti entro un dispositivo cilindrico che viene avvitato oppure sistemato ad incastro sulla volata dell'arma;
- b) *a valvola a pressione*: un disco di chiusura che scatta al passaggio del proiettile, bloccando la fuoriuscita dei gas che vengono deviati verso un serbatoio di espansione;
- c) *ad assorbimento d'energia*: attraverso un congegno che prevede la compressione di molle, l'azionamento di turbine o la formazione di vortici e di rimbalzi, l'effetto dei gas viene smorzato, con riduzione dell'emissione acustica;
- d) *a sfiati e trappole*: grazie ad una serie di fori situati lungo la canna, i gas vengono veicolati in camere di espansione ed infine fuoriescono quando la pressione in canna diminuisce;
- e) *a combinazione*: mediante l'effetto combinato di due o più dei predetti sistemi.

MUNIZIONAMENTO O CARTUCCIA

La **cartuccia** è costituita dal bossolo, contenente propellente e innesco, e dal proiettile.

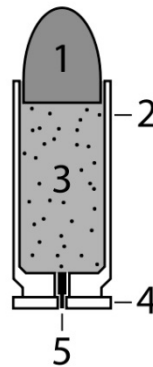


Fig. 4: Parti di cartuccia di pistola: 1) proiettile; 2) colletto; 3) carica di lancio; 4) fondello del bossolo; 5) capsula dell'innesco.

Il proiettile viene assicurato saldamente al bossolo a livello del colletto con semplice attrito oppure mediante costrizione circonferenziale (crimpatura o cifratura) realizzata durante lo stampaggio del proiettile all'altezza del corpo.

La cartuccia è individuata da un **calibro** che può seguire due nomenclature: *Europea o Tedesca; Anglosassone o Inglese*.

L'unità di misura del sistema europeo è il metro e i suoi sottomultipli e il metodo europeo fa riferimento alla lunghezza del bossolo (dal piano del fondello al vivo del colletto)

Il sistema Anglosassone impiega, invece, come unità di misura il pollice e sue frazioni in riferimento, però, al solo proiettile.

Il suffisso M (Magnum) aggiunto all'indicazione del calibro indica una cartuccia più potente (in Europa viene adoperato il termine "Super").

Il **bossolo** può essere costituito da differenti materiali (leghe metalliche, plastica, combinati) e può avere forme differenti (cilindrica, conica, rastremata, a bottiglia) (fig. 5).

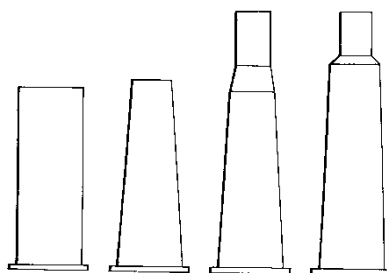


Fig. 5: Forme di bossoli: da sinistra a destra rispettivamente cilindrica, conica, rastremata, a bottiglia. (da Ugolini A.: *L'esperto balistico*. Editoriale Olimpia, Firenze, 1983)

L'**innesco**, o apparato di accensione della carica di lancio, è rappresentato da una miscela combustibile che si infiamma se sottoposta ad urto da parte di un agente meccanico (percussore).

La miscela è a base di sali organici di piombo, cui si aggiungono altri composti organici come pentrite o tetrazene a loro volta detonanti.

La **carica di lancio o propellente** è un composto chimico che sotto l'effetto della fiamma di innesco deflagra sprigionando gas la cui espansione esercita una forza propulsiva sul proiettile che, superato il vincolo che lo lega al bossolo, viene proiettato attraverso la canna e sospinto fuori di essa.

I **proiettili** sono corpi solidi in genere costituiti di piombo nudo o camiciato (vale a dire rivestito da una lamina di altro metallo), o da altri metalli come carburo di tungsteno oppure uranio impoverito.

Possono avere differente composizione, morfologia, massa, dimensioni.

Nei proiettili camiciati, la mantellatura del nucleo o nocciolo di piombo può rivestire l'intera superficie o essere presente solo alla base, alla superficie laterale, alla base e al corpo (mezzo mantello), alla testa (metal point), alla testa e al corpo (tipo solido militare).

La morfologia del proiettile può essere di tipo sferico, cilindrico, cilindro-emisferico (corpo cilindrico e testa arrotondata), cilindro-ogivale, cilindro-conico (corpo cilindrico a testa conica tronca), conico rastremato (corpo cilindrico, testa ogivale o conica), biconico al centro (fig. 6).

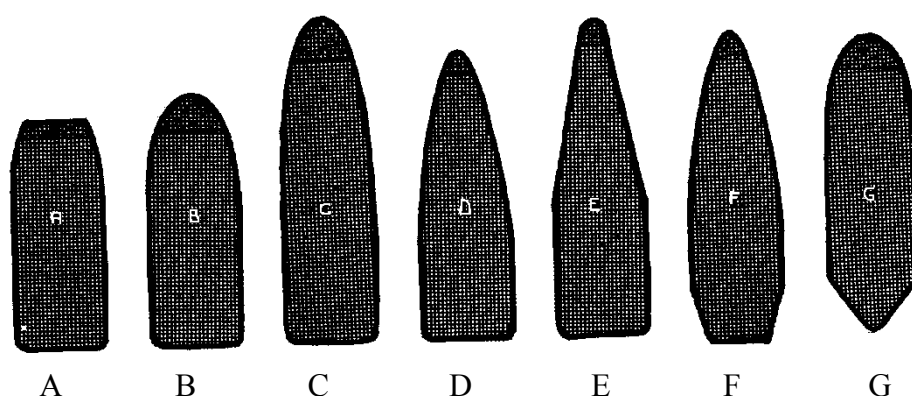


Fig. 6: Forme di proiettili: a) testa piatta o tronca; b) testa arrotondata; c) testa ogivale; d) testa ogivale acuta; e) testa acuta a cono; f) testa ogivale acuta e base rastremata; g) testa ogivale e rastrematura del fondello a cono.
(da Ugolini A.: *L'esperto balistico*. Editoriale Olimpia, Firenze, 1983)

Il calibro rappresenta il diametro maggiore del proiettile misurato prima dello sparo e abitualmente è di poco superiore al calibro dell'anima della canna, al fine di consentire un adeguato intaglio sui pieni della rigatura.

NOZIONI DI BALISTICA

La balistica studia il movimento del proiettile e i fenomeni ad esso correlati²⁷.

Lo studio della balistica verte su 3 aspetti principali: la balistica interna, esterna e terminale.

La balistica interna studia il funzionamento dell'arma e i fenomeni fisici e chimici che caratterizzano lo sparo.

La balistica esterna analizza il moto del proiettile e la sua traiettoria dalla fuoriuscita dalla canna dell'arma da sparo fino al raggiungimento del bersaglio.

La balistica terminale studia gli effetti che caratterizzano l'impatto del proiettile contro il bersaglio.

²⁷ *Op. cit.* sub 7

Balistica interna

Quando viene azionato il congegno di sparo si provoca la percussione della capsula, con accensione dell'innesco e conseguente deflagrazione della carica di lancio.

L'azione esercitata dall'espansione dei gas sprigionatisi a seguito della deflagrazione supera la resistenza offerta dalla ciferatura ed il proiettile, scrimpato il colletto, viene sospinto all'interno della canna.

Dopo aver abbandonato la porzione di canna non rigata (free-boring), il proiettile impegna la rigatura, i cui piani ne intagliano la superficie, con produzione di solchi denominati macrostriature (fig. 7).

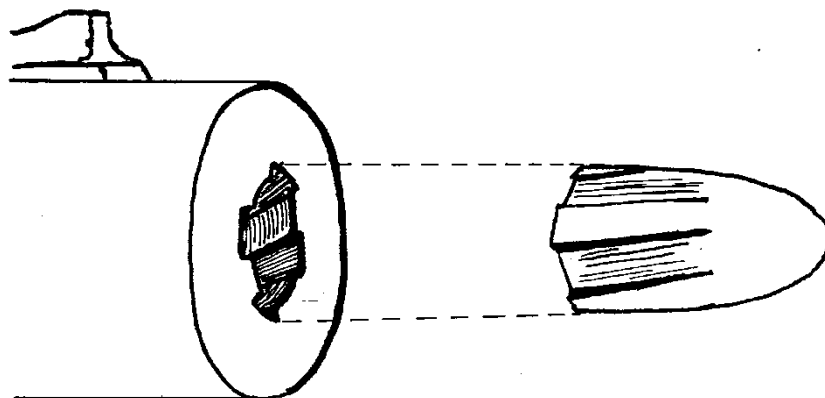


Fig. 7: Formazione di macrostriature in canna rigata (da Ugolini A.: *L'esperto balistico*. Editoriale Olimpia, Firenze, 1983)

Le macrostriature percorrono come su di un binario i pieni della rigatura e, in virtù del loro andamento elicoidale, il proiettile assume moto rotatorio sul proprio asse maggiore.

Durante il passaggio attraverso la canna, a causa dell'attrito determinato dalla presenza di imperfezioni casuali e microscopiche dell'anima della stessa prodottesi sia durante il procedimento produttivo dell'arma che per usura o deposito di sporco, sulla superficie del proiettile si formano anche microimpronte o microstriature parallele alle macrostriature.

Lo sparo determina anche la formazione di calore, per la scrimpatura del colletto del bossolo, lo scorrimento del proiettile, la combustione dell'innesco, la deflagrazione della carica di lancio²⁸.

Il calore prodotto determina dilatazione della canna e ciò comporta che, in una serie di colpi esplosi a breve distanza di tempo l'uno

²⁸ *Op. cit.* sub 7

dall'altro, le microimpronte possono modificarsi progressivamente dal primo all'ultimo proiettile, per crescente dilatazione della canna.

Tale fenomeno è particolarmente evidente nelle armi automatiche, in quanto la rapida successione dei colpi comporta la produzione di notevole energia termica in breve intervallo di tempo.

L'INDAGINE BALISTICA

IL SOPRALLUOGO GIUDIZIARIO

Il **sopralluogo giudiziario** è l'insieme di attività poste in essere dagli investigatori sulla scena del crimine finalizzate alla raccolta ed alla registrazione di elementi utili alla ricostruzione della dinamica dell'evento delittuoso nonché alla ricerca di eventuali tracce del colpevole²⁹.

Esso rappresenta un momento di collaborazione tra magistratura, polizia giudiziaria, polizia scientifica e medicina legale e si configura come “indagine diretta”, prevista nell'ambito degli “accertamenti urgenti”, regolati dall'Art. 354 c.p.p..

Le indagini di sopralluogo si svolgono attraverso 4 fasi principali:

²⁹ Norelli G. A., Buccelli C., Fineschi V., *Medicina Legale e delle Assicurazioni*, Piccin, Padova, 2014

- 1) **Congelamento o fissazione della scena del crimine:** viene eseguito dagli Ufficiali ed Agenti di Polizia Giudiziaria i quali forniscono un quadro descrittivo completo ed articolato della scena, dopo aver preliminarmente delimitato l'area utilizzando un nastro o delle corde ad indicare un limite invalicabile per non addetti ai lavori, al fine di prevenire ogni alterazione o contaminazione delle prove fisiche.
- 2) **Rilievo, repertamento e accertamenti su luogo, cose e tracce:** i rilievi vengono effettuati mediante fotografie, disegni, misurazioni e consentono la ricostruzione futura naturale o computerizzata della scena. Una volta individuati i reperti, essi vanno segnalati cerchiando con un gessetto la superficie in cui sono compresi e apponendo un cartellino numerato. Dopo essere stati documentati anche

fotograficamente, i reperti vengono prelevati e conservati in modo che non siano alterati e manomessi, al fine di preservarne il valore probatorio.

- 3) **Rilievi sulla persona:** sono finalizzati alla ricerca di tracce o altri effetti rilevabili sulla persona, come ad esempio l'individuazione di residui di sparo, segni di percosse o lesioni o l'ottenimento di campioni biologici per le indagini genetiche.
- 4) **Documentazione delle operazioni di sopralluogo:** è rappresentata dal verbale di sopralluogo il quale, al termine delle operazioni e mediante l'integrazione dei dati ricavati dalle diverse fasi delle stesse, descrive la dinamica dei fatti ed ove possibile, ne chiarisce epoca, modalità, mezzi adoperati e soggetti coinvolti.

La presenza di odori o residui di sparo è suggestiva per un recente impiego di armi da fuoco.

L'eventuale reperimento di materiale balistico (armi, munizioni, bossoli o proiettili) va, come si è detto, repertata e registrata anche mediante apparecchiatura fotografica.

La collocazione dell'arma ritrovata va rilevata, misurando le distanze da almeno due punti fissi dell'ambiente.

E' necessario tenere conto della distanza relativa dell'arma da altri reperti (es. bossoli), così come la direzione della canna dell'arma da fuoco al momento del suo ritrovamento.

Al fine di ricostruire la traiettoria del proiettile può essere utile l'impiego di nastri colorati, così come la ricerca di eventuali segni di impatto di proiettili su mura ed oggetti.

In vasti spazi aperti è importante indicare il riferimento del nord bussola, mediante l'apposizione di una freccia visibile in fotografia, al fine di mostrare l'angolazione della canna rispetto a tale direzione.

L'arma eventualmente ritrovata non va aperta o scaricata; essa va rimossa e repertata prestando attenzione a non cancellare eventuali impronte e/o disperdere eventuali residui; su di essa va apposto un cartellino con annotate informazioni descrittive dettagliate (tipo, nome del produttore, modello, numero di serie, calibro, tipo di finitura, lunghezza della canna, eventuali accessori come silenziatori, dispositivi di puntamento, etc...) ³⁰.

³⁰ Vinci F., Strada L., Cassano V., Vitale L.: Esperienze di repertazione, catalogazione e conservazione dei reperti balistici nell'Istituto di Medicina Legale e delle Assicurazioni dell'Università degli Studi di Bari. Riv. Polizia, 1992

L'IDENTIFICAZIONE DEI REPERTI BALISTICI

L'analisi dei reperti balistici ai fini dell'identificazione dell'arma da sparo è strutturata sullo studio delle impronte da essa lasciate sul bossolo e/o sul proiettile.

In caso di repertazione dell'arma si può procedere a comparazione di bossoli e proiettili sparati impiegando cartucce di tipo e marca identici a quelli repertati sulla scena del crimine.

Il compito è molto complesso se l'arma non è sequestrata oppure è sequestrata ma non sospettata.

In tal caso l'indagine balistica sarà articolata in differenti fasi:

- a) individuazione delle *caratteristiche di classe d'arma*³¹;
- b) individuazione di *caratteristiche di sottoclasse d'arma*³²;
- b) identificazione *individuale*.

³¹ Freeman R.: Consecutively rifled polygon barrels. AFTE J 1978 Jun; 10(2): 40-2

³² Churchman J.: The reproduction of characteristic in signatures of Cooley rifles. RCMP Gaz 1949 May; 11(5): 133-40

Le caratteristiche di classe sono rappresentate dagli elementi distintivi di fabbricazione propri di ogni marca e modello di arma, tali da imprimere, durante lo sparo, impronte con la medesima organizzazione e disposizione reciproca sia su proiettili che su bossoli³³.

Le caratteristiche di sottoclasse sono rappresentate da apprezzabili particolari della superficie un oggetto che sono più restrittive rispetto alle caratteristiche di classe in quanto sono: 1) realizzate incidentalmente durante il processo produttivo; 2) si riferiscono ad un gruppo ristretto (un sottoinsieme della classe di appartenenza); 3) possono essere prodotte da fattori variabili nel tempo³⁴.

Alcuni esempi di caratteristiche di sottoclasse sono costituiti da imperfezioni sulla superficie dello strumento che produce la rigatura e

³³ *Op. cit.* sub 7

³⁴ AFTE Criteria for Identification Committee. Theory of identification, range of striae comparison reports and modified glossary definitions— an AFTE criteria for identification committee report. AFTE J 1992;24(2):336–40

che impartisce simili segni su un certo numero di canne prima di essere modificate per usura o rifinitura³⁵.

Si deve usare cautela nel distinguere tali caratteristiche da quelle individuali.

Le caratteristiche individuali rappresentano segni unici per un particolare esemplare e lo distinguono da tutti gli altri in virtù delle imperfezioni o irregolarità di superficie determinatesi casualmente durante i processi di produzione, in seguito all'uso, alla corrosione oppure per effetto di malfunzionamenti e danneggiamenti³⁶.

Nel corso delle indagini balistiche, quando vengano repertati **proiettili**, se ne analizzano il calibro, le caratteristiche della rigatura e si ricercano particolari segni, quali quelli da impiego di silenziatore, da manomissione o corrosione dell'anima della canna)³⁷.

³⁵ Nichols RG. Defending the scientific foundations of the firearms and tool mark identification discipline: responding to recent challenges. J Forensic Sci 2007; May;52(3):586-94.

³⁶ Murdock, J. 1981. A general discussion of gun barrel individuality and an empirical assessment of the individuality of consecutively button rifled .22 caliber rifle barrels. AFTE J 13 (3): 84-111

³⁷ *Op. cit.* sub 7

Le caratteristiche della rigatura comprendono:

- a) *angolo della nervatura;*
- b) *passo;*
- c) *profilo, forma e dimensioni* dei pieni e dei vuoti

(macrostriature);

- d) *verso* (destrorso o sinistorso);
- e) *numero delle righe.*

L'angolo della nervatura mediante l'impiego di un microscopio munito di oculare con reticolo goniometrico, mentre la larghezza della macrostriatura si misura con microscopio fornito di reticolo micrometrico.

Le caratteristiche delle macrostriature sono costanti per un determinato gruppo e lotto d'armi (identità di classe); le microstriature, invece, sono tipiche di una singola arma (identità individuale).

L'immagine archiviata del proiettile consente una comparazione con analoghe di proiettili repertati in scene del crimine differenti al fine di collegare fatti delittuosi apparentemente indipendenti.

E' ciò che accade quando la polizia scientifica impiega il sistema I.B.I.S. (*Integrated Ballistic Identification System*), di cui si parlerà in appresso.

Nel caso in cui, oltre a proiettili, venga repertata anche l'arma, si procede alla comparazione di un proiettile sparato sperimentalmente dall'arma repertata con quelli rinvenuti sulla scena del crimine.

Al fine di tale comparazione sono di particolare rilievo le microimpronte o microstriature che rappresentano, come si è detto, caratteristiche individuali che contraddistinguono ciascun esemplare di arma da fuoco.

Lo studio delle microimpronte prevede comunemente l'impiego del microscopio comparatore che permette di vedere e fotografare i due

proiettili, in posizioni adiacenti, giustappponendo otticamente le immagini per mezzo della regolazione dell'angolo dei due prismi che portano l'immagine dagli obiettivi all'oculare.

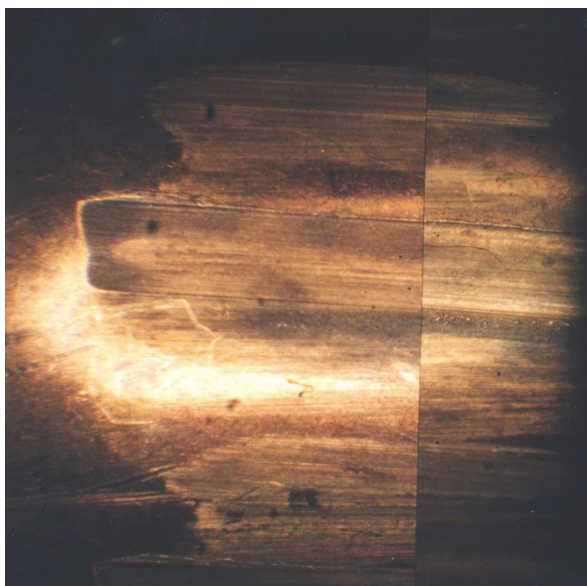


Fig. 8: Esame comparativo di striature di proiettili: si noti la corrispondenza tra microstriature dei proiettili destro e sinistro

Se due proiettili provengono dalla stessa arma si osserva che, affiancando le loro immagini, le microstriature presenti sulla superficie di un proiettile si continuano in quelle dell'altro (fig. 8); tale corrispondenza è alla base dell'identificazione in campo balistico.

Detta comparazione può anche essere eseguita con sistemi microscopici non ottici (es.: microscopio elettronico a scansione o con ricostruzione digitalizzata dell'immagine).

Alcuni “segni” caratteristici vengono impressi sulla superficie del proiettile dall'uso di silenziatore.

Le armi silenziate mediante fori di sfogo lungo la canna presentano abrasioni a disposizione regolare e parallela ai solchi della rigatura in corrispondenza dei pieni.

Nel caso dei silenziatori a valvola si osserva un'intaccatura liscia e leggermente arrotondata sulla superficie del proiettile che può essere confusa con la deformazione provocata dall'impatto sul bersaglio.

In caso di manomissione della superficie rigata delle canne, si osservano abrasioni regolari e longitudinali anche a livello delle macrostriature.

Se la rigatura dell'arma è danneggiata da corrosione si osservano abrasioni discontinue, irregolari, non interamente periferiche.

Ciò si ripercuote sulla formazione delle microstriature, rendendo difficile il compito identificativo, come in caso di usura, cattiva manutenzione, depositi di residui di combustione o danni alla rigatura arrecati dall'azione di proiettili anomali o corpi estranei.

Tali segni possono essere distinti da quelli legati alla penetrazione del proiettile in materiale duro, in quanto questi ultimi sono in genere irregolari e presenti anche sulla testa del proiettile.

Per quanto concerne lo studio dei **bossoli** vanno analizzate la struttura, le dimensioni, le impronte determinate dai meccanismi di estrazione ed espulsione, in riferimento alla loro disposizione, morfologia, dimensioni e loro posizione reciproca, oltre al cratere di percussione di cui vanno valutate forma e dimensioni.

Le impronte dell'unghia dell'estrattore, del piano di espulsione, della testa del percussore prodotte in corrispondenza del fondello e del corpo del bossolo sono peculiari per ogni marca e tipo d'arma (caratteristiche di classe) e, pertanto, sono utili ai fini dell'identificazione dell'arma.

L'analisi del fondello dei bossoli viene compiuta suddividendone la superficie in quadranti.

L'esame comparativo del bossolo repertato con quello sparato per prova consente l'individuazione di identità di classe o individuale allo stesso modo di quanto detto per i proiettili.

Il microscopio comparatore non è sempre adeguato alla comparazione della superficie dei bossoli, in quanto giustapponendo le immagini si escludono porzioni di superficie delle quali va studiata la corrispondenza.

Pertanto, per tali indagini viene impiegato un proiettore epidiascopico.

LO STATO DELL'ARTE ED IL SISTEMA I.B.I.S.

Quando la Polizia Scientifica reperta materiale balistico (bossoli o proiettili) vengono innanzitutto esaminati i fondelli di ciascun bossolo e le superfici di ciascun proiettile al fine di identificare la classe d'arma.

Tali operazioni vengono compiute con l'impiego di microscopi dotati di micrometri digitali.

I dati ricavati vengono confrontati con *data base* di riferimento, costituiti dal *General Rifling Characteristics File* (sistema di dell'F.B.I. contenente informazioni relative a circa 20.000 differenti armi da fuoco) e di *Gunstore* (sistema informativo della Polizia Scientifica italiana).

Dette banche dati vengono continuamente aggiornate in quanto periodicamente i produttori di armi presenti sul territorio italiano inviano 4 bossoli-test allo scopo di ampliare i dati archiviati nel sistema.

Dopo aver studiato le caratteristiche di classe d'arma, le immagini digitalizzate dei reperti balistici vengono elaborate da sistemi di comparazione che, attraverso il confronto con i dati presenti in archivio e ricavati da reperti balistici sequestrati sul territorio nazionale, consentono di evidenziare l'eventuale collegamento tra il crimine oggetto dell'indagine ed analoghi fatti delittuosi.

I sistemi di comparazione maggiormente impiegati nel mondo sono il DRUGFIRE e l'IBIS (*Integrated Ballistics Identification System*), quest'ultimo adottato in Italia dalla Polizia di Stato e dai Carabinieri.

Essi rappresentano sistemi standardizzati e automatizzati di acquisizione, archiviazione, ricerca e confronto di immagini di impronte rilevate su bossoli e proiettili³⁸.

³⁸ Redaelli D., La Balistica Forense, L'identificazione delle armi, dei bossoli e dei proiettili, metodologie microscopico-comparative e moderne tecniche di confronto, Secondo seminario "La Scienza contro il crimine", Università degli Studi di Pavia, 11/05/2005

Attualmente il sistema IBIS rappresenta quello maggiormente adoperato dalle forze di Polizia mondiali ed in uso alla Polizia di Stato ed ai Carabinieri dal 2001.

Sistema IBIS (Integrated Ballistics Identification System)

Si tratta di un sistema adottato per la prima volta dalla Polizia canadese, in grado di acquisire immagini ad alta risoluzione relative a proiettili e bossoli esplosi mediante l'impiego di un microscopio connesso ad un computer.

Detto sistema si è evoluto fino a consentire l'ottenimento di immagini ricostruttive in 3D, attraverso l'introduzione della tecnologia IBIS Bullettrax-3D adottata sulle piattaforme di ultima generazione denominate IBIS Matchpoint+³⁹.

³⁹ Dillon JH. BulletTRAX™-3D, MatchPoint Plus and the Firearms Examiner. Evidence Technology Magazine, July–August 2005

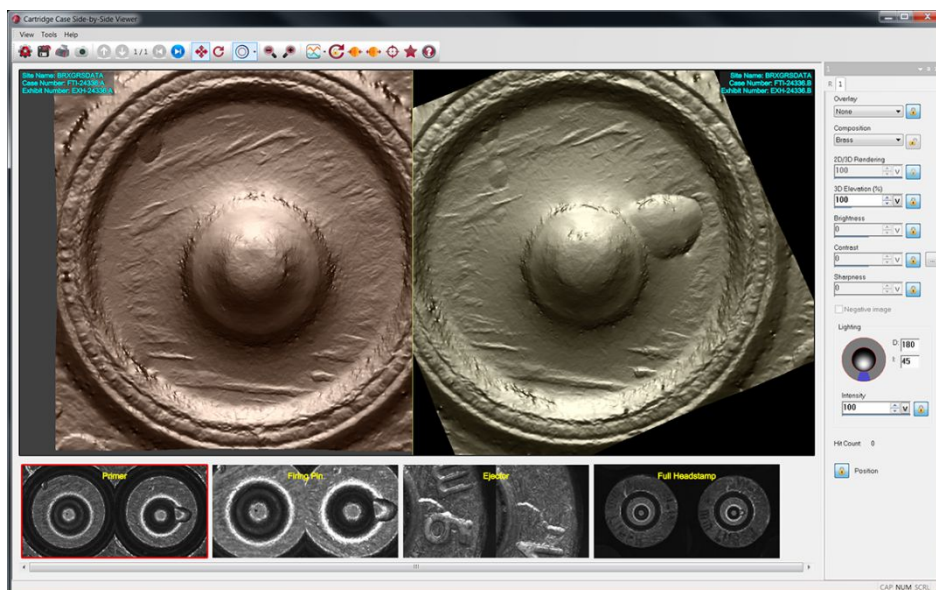


Fig. 9: Esempio di schermata del sistema IBIS Bullettrax-3D: l'immagine in 3D è relativa ad impronte di percussore sulla capsula di 2 bossoli.

Le immagini ricavate vengono processate con specifici algoritmi di calcolo, fino ad ottenere un codice numerico univoco in grado di identificare i segni caratteristici impressi sui reperti dalle armi che li hanno esplosi e tali dati, unitamente alle immagini dalle quali sono ricavati, sono inseriti in un archivio informatico collegato alle altre postazioni IBIS collegate in rete.

Ogni volta che un reperto viene inserito in archivio, il sistema procede mediante l'impiego di un modello matematico proprio del

sistema IBIS⁴⁰ ad uno screening degli altri dati già presenti, al fine di ricercare una correlazione con altri casi.

Si ottiene, in tal modo, un elenco di casi correlati ordinati per probabilità decrescente sulla scorta dei quali l'esperto balistico compie l'esame comparativo al fine di pervenire all'identificazione dell'arma che ha esploso i reperti e collegare distinti fatti delittuosi⁴¹.

In definitiva, il giudizio viene sempre formulato sulla base dell'osservazione diretta da parte degli operatori, la quale resta, comunque, legata alla soggettività di lettura⁴².

Al fine di ricercare correlazioni tra reperti acquisiti in diversi paesi, è stata istituita la rete IBIN (INTERPOL Ballistic Information Network), che pone in connessione le banche dati IBIS di diverse nazioni.

⁴⁰ Geradts Z. , Bijhold J. , Hermesen R.: Pattern recognition in a database of cartridge cases, Proc. SPIE Vol. 3576, p. 104-115, Investigation and forensic science technologies, Katreen Higgins ed., 1999

⁴¹ Nennstiel, R. and Rahm, J. (2006), An Experience Report Regarding the Performance of the IBIS™ Correlator. Journal of Forensic Sciences, 51: 24–30

⁴² Nichols RG. Defending the scientific foundations of the firearms and tool mark identification discipline: responding to recent challenges. J Forensic Sci 2007; May;52(3):586-94

Al mese di marzo del 2016 risultano essere stati correlati, mediante la rete IBIN, 29 casi tra Spagna e Portogallo, 5 tra Svezia e Danimarca, 1 tra Svezia e Norvegia ed 1 tra Gran Bretagna ed Olanda.

ESPERIENZA CONDOTTA

Il nostro studio si inserisce nella linea operativa tracciata dai sistemi Drugstore ed IBIS, con lo scopo di superare le problematiche legate alla soggettività degli operatori che analizzano i reperti balistici attraverso l'osservazione diretta ossia visiva.

In tale ottica già in passato il nostro Dipartimento ha condotto alcune esperienze per l'identificazione dei proiettili mediante rugosimetro a raggio laser⁴³ e con l'ausilio di sofisticati algoritmi di elaborazione del segnale ricavato da immagini digitalizzate⁴⁴.

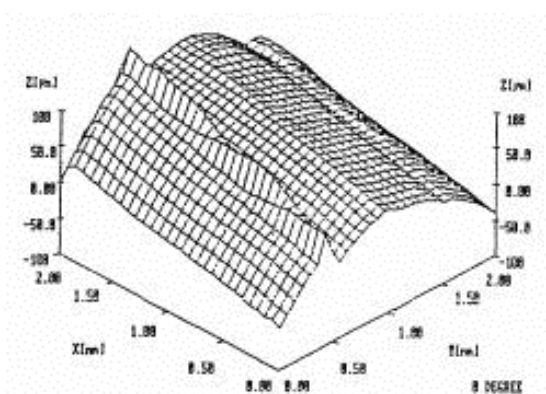


Fig. 10: Rilievo tridimensionale di macrostriatura mediante rugosimetro laser

⁴³ Romano C., Donnarumma A., Buccelli C., Quaremba G., Esposito M., Pilleri M.: Nuove tecniche in balistica forense per l'identificazione di proiettili mediante rugosimetro a raggio laser. Quad. Cam., XIV, 2, 1992

⁴⁴ Niola V., Buccelli C., Gervasio L., Pilleri M., Policino F., Quaremba G., The Impact Of The Wavelet Transform On The Problem Of Firearm Identification: First Evidences, WSEAS Transactions on Signal Processing, Vol. 2, No.2, 2006, pp.67-73

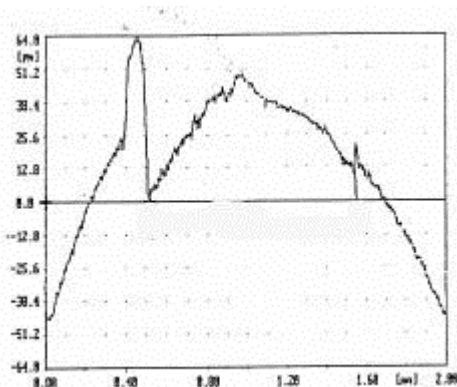


Fig. 11: Profilo verticale di macrostriatura mediante rugosimetro laser

Attraverso tali precedenti esperienze si è pervenuti ad una metodica computerizzata di comparazione di immagini della superficie di proiettili in grado di fornire risultati in forma grafica.

Partendo da queste precedenti esperienze si è strutturata la presente ricerca, con lo scopo di ottenere parametri numerici capaci di quantificare il livello di sovrapponibilità.

Il precedente protocollo effettuava il confronto tra una delle sei immagini di uno dei due proiettili in esame e tutte e sei le immagini dell'altro proiettile al fine di individuare la coppia che presenta il grado di sovrapposizione massimo.

Ognuno di tali confronti si è sviluppato nei seguenti passi:

1. Dall'immagine elaborata con la trasformata di Radon^{45,46,47,48,49} si è selezionata la parte superiore della media frequenza.
2. Si è effettuata la scomposizione Wavelet bidimensionale della matrice corrispondente alla regione selezionata (per maggiori dettagli sulla trasformata wavelet v. Appendice).
3. Si è proceduto ad un *denoising* dell'immagine tramite analisi multirisoluzione basata ancora sulla trasformata Wavelet ricostruendo l'immagine in precedenza scomposta ed eliminando, dalla ricostruzione, i livelli di dettaglio più alti relativi a rumore ad alta frequenza.
4. Si sono confrontati i coefficienti Wavelet dell'immagine così ricostruita con quelli di un'altra immagine. I risultati dei confronti erano mostrati, in questa fase della ricerca, in forma grafica per mezzo della sovrapposizione dei diversi andamenti dei coefficienti.

⁴⁵ Mallat S.G., Multiresolution approximations and wavelet orthonormal bases of L_2 , *Trans. Amer. Math. Soc.*, Vol.1, No.315, 1989, pp. 69-87

⁴⁶ Hough P.V.C., A method and means for recognizing complex patterns, *US Patent*, No.3,069,654, Dec. 1962

⁴⁷ Deans S.R., Hough Transform from the Radon Transform, *IEEE PAMI*, Vol.3, No.2, 1981, pp. 185-188

⁴⁸ Özdoğan Y., *Seismic Data Processing. Soc. of Exploration Geophysicists*, Tulsa, Oklahoma, 1987

⁴⁹ Toft P., Radon transformation. *Lecture Note for DTU course 4235: Advanced Digital Signal Processing, Electronics Institute University of Denmark*, 1994

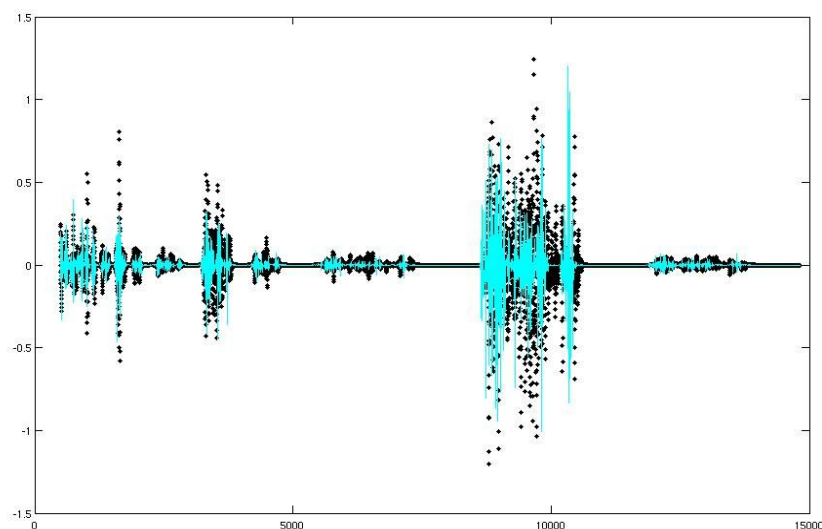


Fig. 12: confronto in termini di sovrapposizione delle serie numeriche dei coefficienti Wavelet relativi al livello di dettaglio 4 dell'analisi multirisoluzione. In nero è la serie numerica della prima rigatura del confronto, in ciano la seconda. Si noti la buona sovrapposizione nel caso di proiettili esplosi dalla medesima arma.

Individuata, visivamente, la coppia con la migliore sovrapposizione, si è proceduto a verificare che anche le serie numeriche delle restanti 5 coppie ottenute in successione presentassero un elevato grado di sovrapposibilità.

Se una sequenza completa ed esaustiva di tutte e sei le coppie corrispondenti sui due proiettili veniva individuata, poteva ritenersi “dimostrata” graficamente l'appartenenza dei due reperti alla stessa arma.

Si è anche evidenziato che proiettili esplosi da armi diverse dello stesso modello hanno presentato una bassa sovrapponibilità, pur mantenendo un pattern significativo su tutte le macrostriature di entrambi i proiettili.

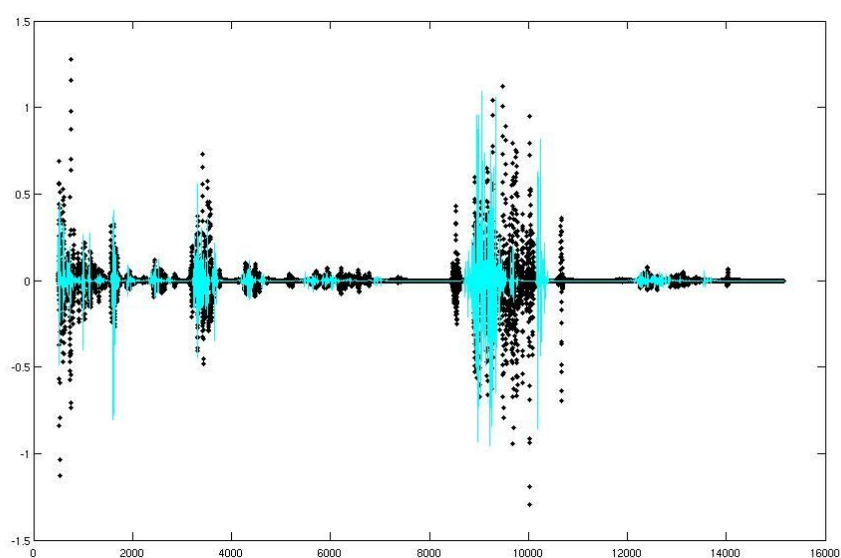


Fig. 13: confronto in termini di sovrapposizione delle serie numeriche dei coefficienti Wavelet relativi al livello di dettaglio 4 dell'analisi multirisoluzione. In nero è la serie numerica della prima rigatura del confronto, in ciano la seconda. Si noti la scarsa sovrapposizione rispetto a quanto mostrato in figura precedente per proiettili esplosi da armi differenti.

Per alcuni ulteriori confronti poi si è fatto uso di una rete neurale appositamente progettata al fine di effettuare un 'soft denoising' delle immagini per ottenere risultati più precisi e migliorare il livello del

confronto soprattutto in quei casi in cui vi possa essere indecisione di giudizio.

Per l'analisi Wavelet si è utilizzata la Wavelet 'db3' della famiglia delle Wavelet descritte da Daubechies. La scelta di una Wavelet di ordine dispari è scaturita dall'osservazione che il contenuto energetico mostrato dal segnale preso in considerazione, e cioè l'intensità dei livelli di grigio delle rigature lungo le ROI (*Region Of Interest*) verticali selezionate, è maggiormente contenuto nella parte sinistra del segnale stesso.

Per questo motivo una Wavelet madre dispari ed in particolar modo concentrata a sinistra, come quella presa in considerazione, permette un fitting migliore del segnale in esame.

Attualmente, avvertendo ancor di più la necessità di pervenire ad un giudizio peritale oggettivo (affidabile e attendibile in termini di esclusione, compatibilità o elevata probabilità, nonché ripetibile),

avvalendosi degli avanzamenti culturali e tecnologici in campo informatico, ingegneristico, nonché nel settore dell'acquisizione digitalizzata e di analisi di immagine, si è proceduto al rilievo e allo studio dei “segni” sui proiettili mediante analisi statistico/matematiche in grado di pervenire ad un giudizio balistico quali-quantitativo oggettivo.

Lo studio balistico intrapreso attraverso la collaborazione tra il nostro Dipartimento ed il Servizio di Polizia Scientifica della Polizia di Stato di Roma e mediante impiego di sistemi avanzati di rilevazione digitalizzata delle immagini, ha posto l'accento sulla comparazione di micro-impronte e micro-striature rilevate su proiettili di calibro 9x21 esplosi attraverso esemplari differenti della medesima arma da fuoco.

Protocollo di sparo e repertazione proiettili

- 1) E' stata impiegata una pistola Beretta, modello 98F.

- 2) Il munizionamento è stato rappresentato da cartucce commerciali 9x21, palla *Full Metal Jacket* in piombo rivestiti in lega di rame, appartenenti allo stesso lotto di fabbricazione.
- 3) L'arma è stata tenuta orizzontale nella stessa posizione per ogni sparo.
- 4) L'azione di sparo è stata compiuta meccanicamente ed in remoto per evitare, o ridurre, la variabilità indotta dalla tecnica di fuoco.
- 5) Si è impiegato un bersaglio fisso costituito da una cassa di recupero proiettili, di dimensioni 2x0.3m riempita con ovatta da sarto interposta a pannelli di cartone distanziati di 20cm.
- 6) La canna è stata pulita a secco tra uno sparo e l'altro, con scovolo di nylon.

- 7) Gli spari sono stati intervallati da un'attesa di 10 minuti con l'arma a carrello aperto per far raffreddare la canna, al fine di escludere l'effetto della dilatazione del metallo causata dal calore.
- 8) Sono stati ottenuti 2 proiettili con sei rigature di superficie di tipo sinistrorso o antiorario.
- 9) La superficie dei proiettili è stata detersa con una soluzione a base di tartrato di potassio ed un panno di lino, al fine di rimuovere i residui dello sparo.



Fig. 14: Pistola Beretta mod. 98F

Protocollo di acquisizione delle immagini dei proiettili

Le immagini digitali, in formato TIFF, sono state effettuate da personale esperto della polizia scientifica di stato di Roma, in data 10/07/2014.

Le condizioni di rilevazione a mezzo microscopio ottico comparatore, sono le seguenti:

- a. ingrandimento 4X;
- b. luce anulare 3300°K;
- c. chiusura diaframma 1.8;
- d. esposizione 143ms;
- e. guadagno 1.80;
- f. saturazione 0.25;
- g. filtro Gamma 0.68.

Le raccolte di immagini di proiettili catalogate con la sigla TEST1, sono in numero di tre: 1A (colore), 1B (colore) e 1C (B/N), a loro volta suddivise in immagini di rigature denominate RIG1÷RIG6.

Le raccolte di immagini di proiettili catalogate con la sigla TEST2, sono in numero di tre: 2A (B/N), 2B (B/N) e 2C (colore), a loro volta suddivise in immagini di rigature denominate RIG1÷RIG6.

Comparazione computerizzata delle immagini

Per effettuare un confronto è necessario prima di tutto stabilire i criteri in base ai quali il confronto stesso è da ritenersi buono, vale a dire quando i due proiettili esaminati possono considerarsi sparati dalla stessa arma.

In base alla metodologia classica di confronto, ossia quella praticata dall'esperto balistico mediante l'osservazione diretta al microscopio comparatore, due proiettili possono essere considerati come esplosi dalla medesima arma se i segni caratteristici sia di classe che individuali di tutti e due i proiettili corrispondono⁵⁰.

⁵⁰ AFTE Criteria for Identification Committee. Theory of identification, range of striae comparison reports and modified glossary definitions— an AFTE criteria for identification committee report. AFTE J 1992;24(2):336–40

A tale giudizio si perviene, come si è detto, affiancando le immagini dei due proiettili e verificando che i segni corrispondenti ad una macrostriatura del primo proiettile, con tutte le microstriature presenti al suo interno, “continuano” nel secondo proiettile.

Tale ricerca da parte dell'esperto ha durata di diverse ore, poiché per pervenire ad un giudizio di concordanza utile tra due proiettili tale, cioè, da poterne stabilire l'origine comune dalla medesima arma è necessario che tutte le coppie di striature sui due proiettili corrispondano.

Ad esempio nel caso di proiettili con 6 macrostriature, come quelli presi in esame in questo studio, è necessario verificare che esista una sequenza completa di sei coppie consecutive che corrispondono.

Scopo del progetto è quello di rendere automatico il suddetto procedimento e di integrare l'esperienza dell'esperto con informazioni oggettive e quantizzabili .

Il protocollo messo a punto ha richiesto inizialmente di effettuare il confronto tra una delle sei immagini di uno dei due proiettili in esame e tutte e sei le immagini dell'altro proiettile al fine di individuare la coppia che presenta il grado di sovrapposizione massimo.

La comparazione è stata effettuata tramite elaborazione mediante impiego di rete neurale, consistente nell'amplificazione delle microstriature e loro contrasto tramite *contrast enhancement*.

Successivamente si è proceduto alla elaborazione grafica finalizzata all'ottenimento di coefficienti wavelet in grado di quantificare la sovrapponibilità del segnale grafico e quindi delle microstriature.

Le immagini che seguono si riferiscono a due immagini denominate TEST1_1RIG2 e TEST2_1RIG3, relative a macrostriature di pallottole diverse sparate dalla stessa arma, dal cui confronto sono scaturiti i coefficienti più elevati.

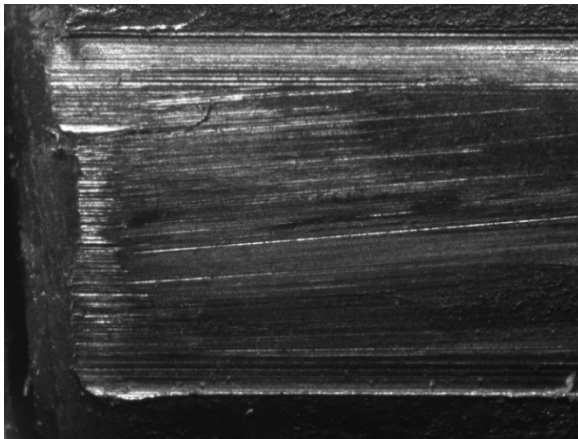


Fig. 15: immagine TEST1_1RIG2

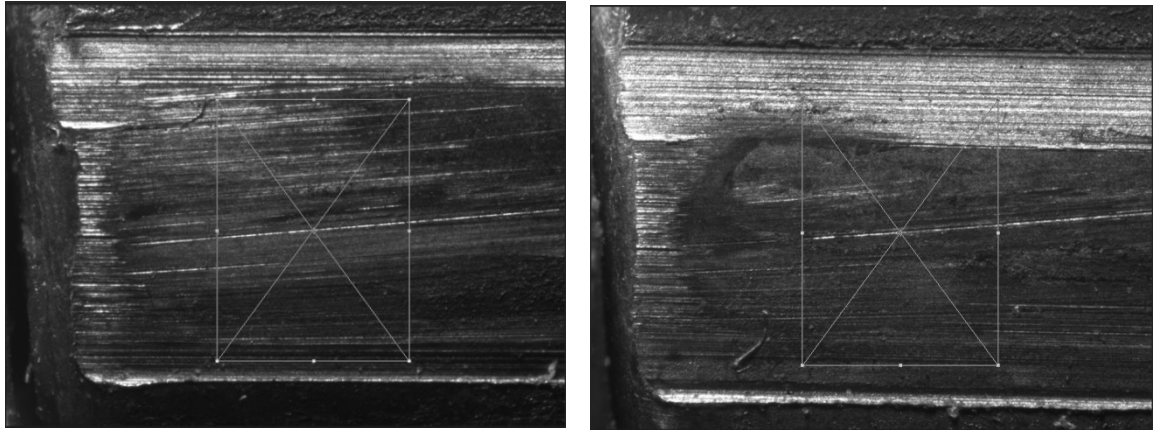


Fig. 16: immagine TEST2_1RIG3

Individuata la coppia con coefficienti più elevati, si è proceduto a verificare che anche le serie numeriche delle restanti 5 coppie ottenute in successione presentavano un elevato grado di sovrapponibilità.

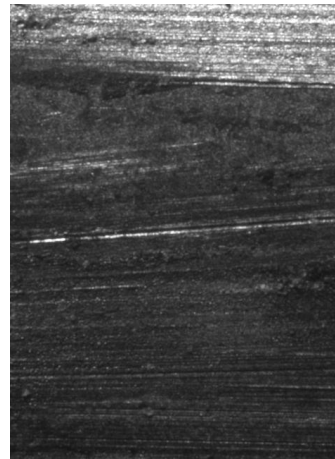
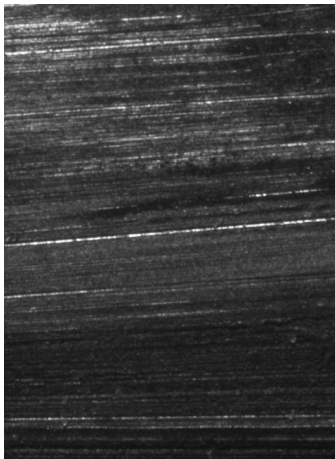
Sono state eseguite indagini di secondo livello, al fine di verificare ulteriormente la corrispondenza nell'ambito delle coppie di macrostriature precedentemente individuate, individuando una regione di interesse (ROI) per ciascuna immagine di macrostriatura sulle quali sono state effettuate le analisi morfologiche della superficie.

Le figure sottostanti illustrano le suddette ROI omologhe. È puramente casuale l'incrocio delle diagonali delle ROI con la microstria di colore bianco.



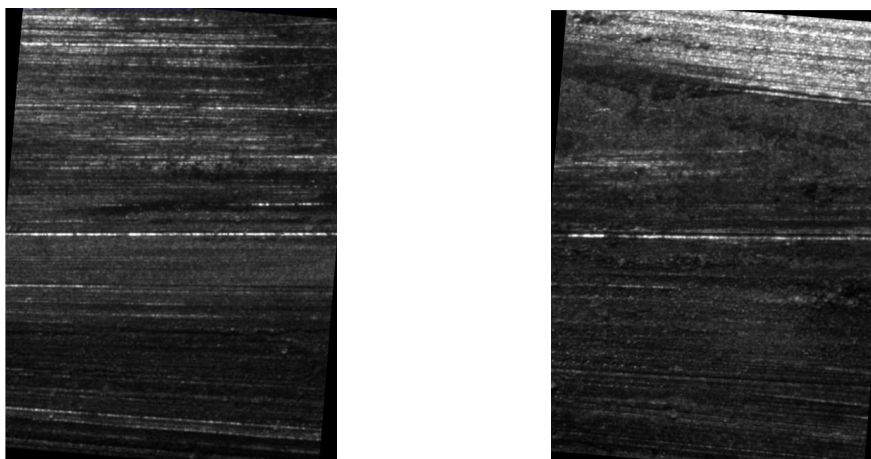
Figg. 17-18: selezione delle ROI

Le due immagini che seguono dettagliano le ROI estratte.



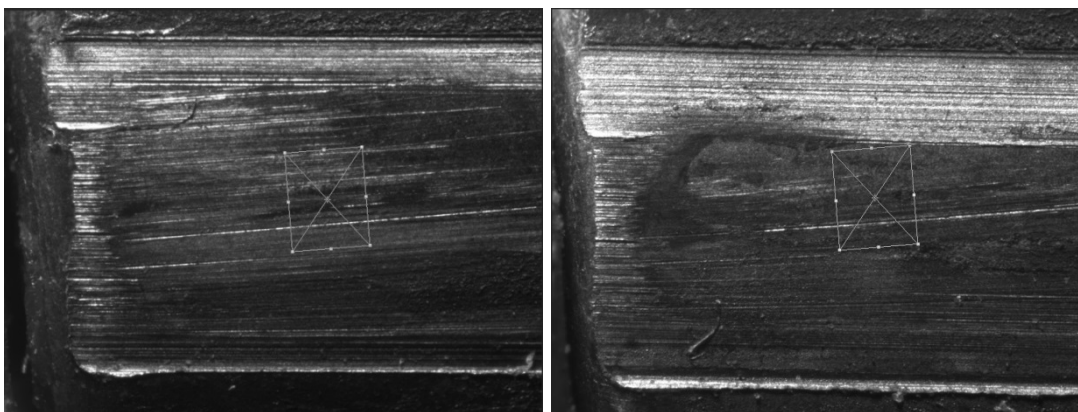
Figg. 19-20: ROI estratte

Successivamente sono state ruotate di circa 4.603° in senso orario, al fine di allineare rispetto all'asse orizzontale, le microstrie (Vedi foto sotto riportate).



Figg. 21-22: ROI allineate sull'asse orizzontale

Sulle suddette ROI sono stati effettuati ulteriori Crop per eliminare le microstrie visibili sulla parte superiore dell'immagine di destra, non presenti nelle corrispondenti microstrie visibili nell'immagine di sinistra.



Figg. 23-24: ulteriore selezione di ROI

Le indagini di dettaglio eseguite su quest'ultime ROI hanno avuto come scopo preciso l'individuazione delle microstrie, appartenenti alla

stessa ROI, che presentano una significativa correlazione riguardo i seguenti punti:

1. nessuna soluzione di continuità;
2. monodirezionalità;
3. inclinazione/pendenza costante;
4. costante densità dei pixel che la compongono;
5. uniformità di livello di grigio;
6. spessore costante;
7. elevata probabilità di un pixel di appartenere alla microstria;
8. illuminazione uniforme;
9. corretta messa a fuoco.

Le matrici numeriche dei livelli di grigio delle suddette ROI sono state divise in parti uguali in modo da poter valutare la semi immagine di sinistra con quella di destra relativa alla stessa ROI di uno stesso proiettile.

L'analisi è stata effettuata attraverso una media geometrica progressiva (MGP) che ha una importante proprietà: essa tende a zero nel caso la microstria presenti una elevata variabilità riguardo ai 9 punti precedenti, invece tende a 1 nel caso opposto.

Nel diagramma che segue è riportato l'andamento delle medie geometriche progressive delle semimatrici suddette da sinistra a destra.

Notiamo come la riga casualmente evidenziata in bianco nella ROI, presenta la più alta ripetibilità circa 0.75 MGP.

Complessivamente il confronto fra le suddette medie (coefficiente di correlazione) è pari a circa 0.81 (valore massimo ottenibile: 1).

Questo indice essendo molto alto ci rassicura in merito alla buona qualità dell'immagine e di conseguenza delle microstrie in essa visibili.

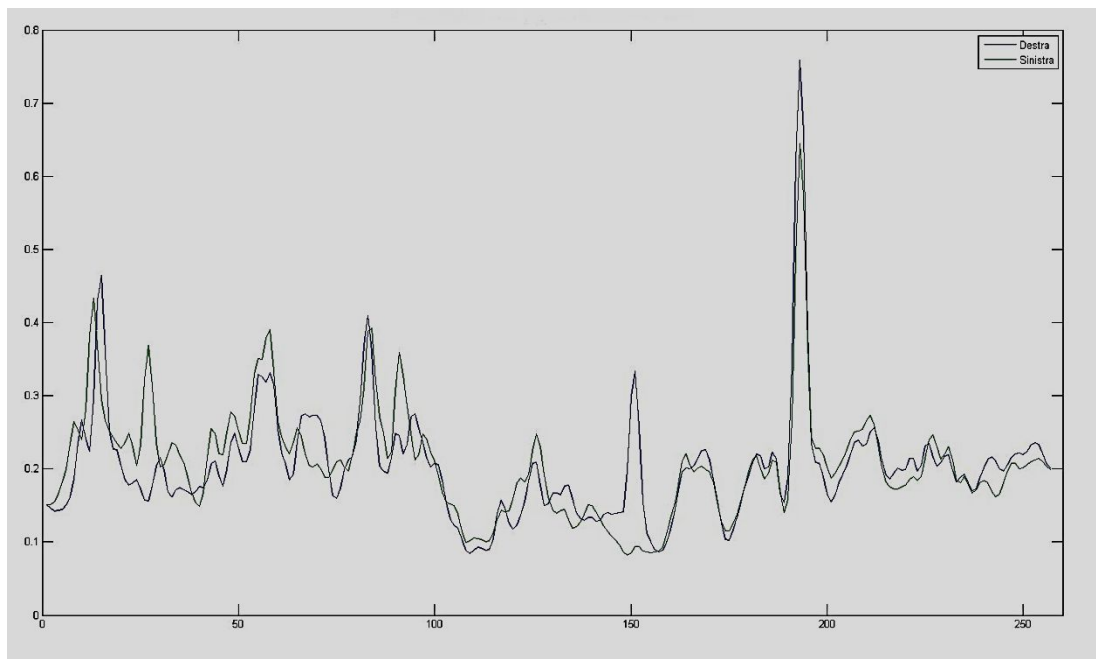


Fig. 25: confronto delle medie geometriche progressive delle semimatrici relative alla ROI estratta dall'immagine TEST1_1RIG2. In questo caso il coefficiente di correlazione è pari a 0,81. Si noti l'ottima corrispondenza dei grafici sovrapposti.

Esso può essere impiegato anche come misura della probabilità di sovrapponibilità delle due sequenze numeriche e quindi della provenienza dei due proiettili esplosi.

Analogo studio è stato effettuato sulla ROI relativa al secondo proiettile.

Il diagramma che segue mostra una minore correlazione morfologica delle microstrie (0.78), così come si evince anche visivamente.

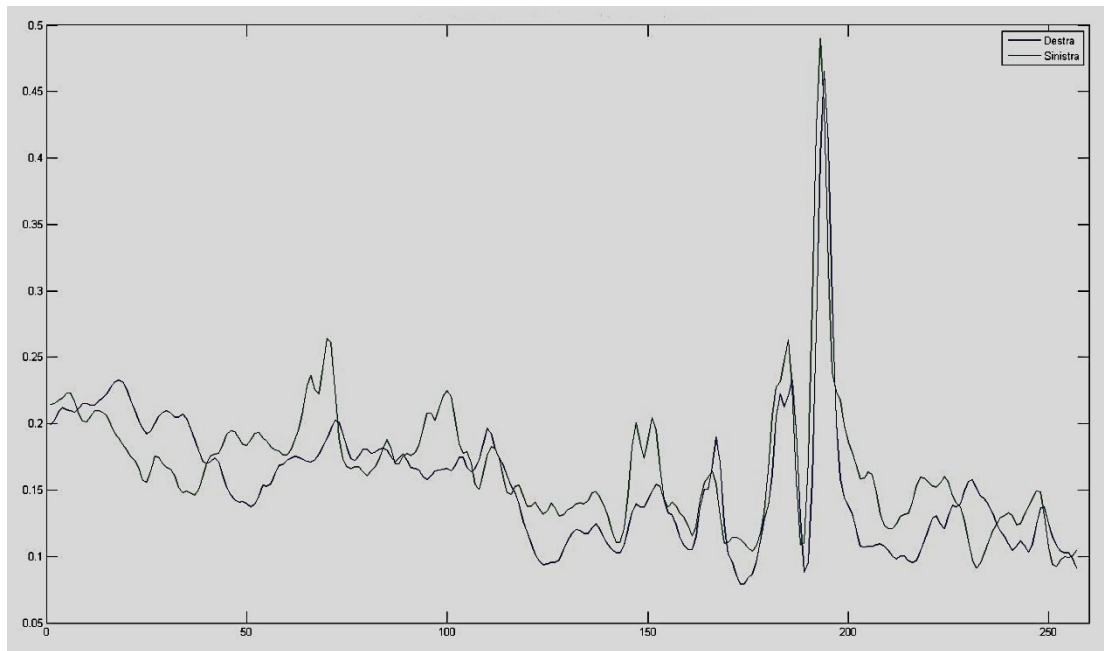
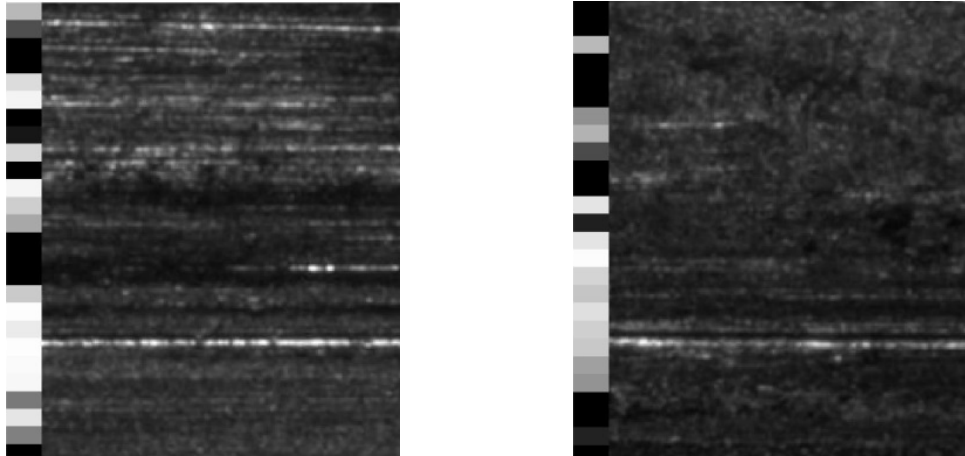


Fig. 26: confronto delle medie geometriche progressive delle semimatrici relative alla ROI estratta dall'immagine TEST2_1RIG3. In questo caso il coefficiente di correlazione è pari a 0,78. Si noti la minore corrispondenza dei grafici sovrapposti.

I due diagrammi sono stati confrontati anche a step di 10 righe, in modo da evidenziare le microstrie che presentano una più alta ripetibilità morfologica, vale a dire che presentano la maggiore continuità.

Sul lato sinistro di ciascuna di esse è visibile una banda verticale che evidenzia le righe a più alta ripetibilità (colore bianco) e a scarsa o comunque molto bassa ripetibilità (colore nero).

Queste ultime sono tali in quanto, molto probabilmente, non correttamente acquisite.



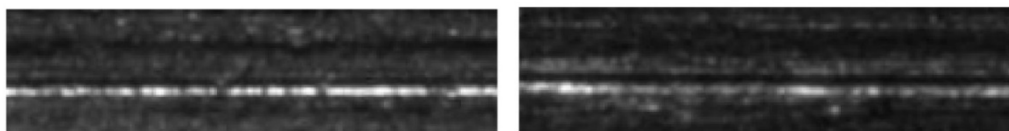
Figg. 27-28: analisi grafica della ripetibilità delle microstriature

Il confronto delle righe per fasce di step 10 consente di localizzare le zone che presentano una migliore corrispondenza morfologica (bande di colore bianco-grigio).

Le fasce che meglio si prestano ad un successivo confronto morfologico sono quelle situate nella parte bassa delle immagini.

In sintesi la morfologia che meglio si presta ad una successiva comparazione è rappresentata dalle due immagini sottostanti.

Esse si riferiscono alle bande riportate nella figura in alto aventi una maggiore correlazione (colore tra il grigio e il bianco).



Figg. 29-30: Bande estratte dalle ROI aventi maggiore correlazione

Procedendo ad una comparazione tra i due proiettili, il diagramma successivo consente la visualizzazione della MGP relativa a ciascuna matrice dei livelli di grigio associata a ciascuna immagine.

La correlazione in totale è pari a 0.87.

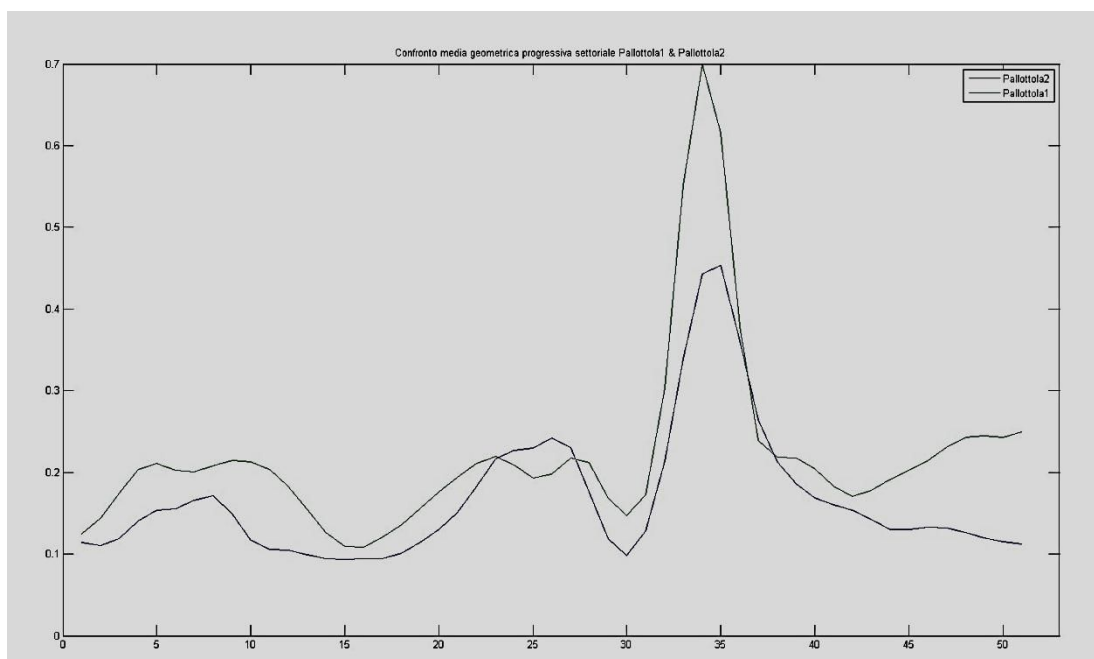


Fig. 31: Confronto della media geometrica progressiva settoriale tra i due proiettili

L'indagine morfologica si dovrebbe completare anche con una valutazione quantitativa dello spessore di ogni singola microstria impiegata per la successiva comparazione/accostamento.

In questa fase riteniamo non valutabile tale parametro per la scarsa qualità di una delle due immagini.

Ad ulteriore conferma di quanto sopra detto si veda l'immagine sottostante, in cui vengono amplificate le microstrie precedentemente identificate, la cui comparazione evidenzia la non sovrapponibilità della maggior parte di esse, nonostante l'alta correlazione calcolata in precedenza.

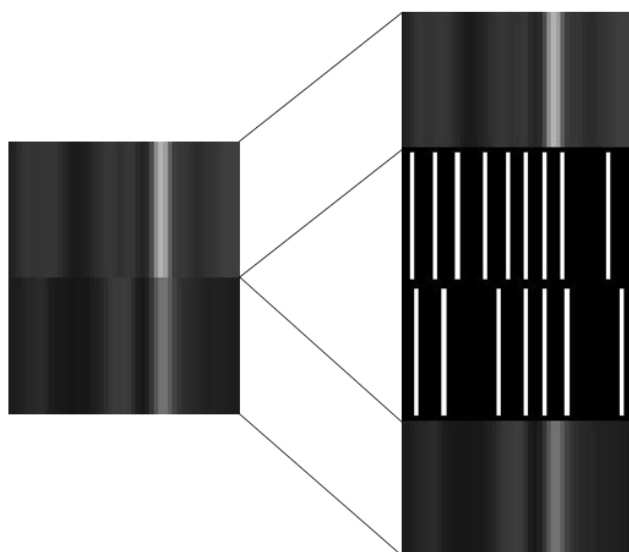


Fig. 32: Comparazione delle immagini amplificate relative alle microstriature

Ciò è indicativo di una insufficiente risoluzione (messa a fuoco) di una delle due immagini, in particolare la seconda.

Nonostante ciò, la metodica approntata consente di pervenire a risultati comparativi altamente significativi circa il numero, la disposizione e la dimensioni di microstriature.

Sulla base di tali elementi è possibile calcolare la probabilità che una sequenza di striature ricorra in maniera casuale, fornendo un metodo affidabile per giustificare sotto il profilo quantitativo il valore di una determinata corrispondenza tra la superficie di 2 proiettili⁵¹.

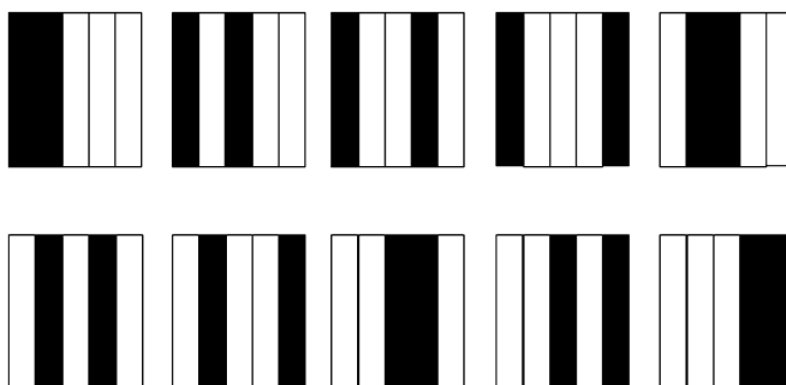


Fig. 33: Diagramma schematico rappresentante 10 possibili modalità di presentazione di 2 striature consecutive corrispondenti (da Howitt, D., Tulleners, F., Cebra, K. and Chen, S. (2008), A Calculation of the Theoretical Significance of Matched Bullets. Journal of Forensic Sciences, 53: 868–875)

⁵¹ Howitt, D., Tulleners, F., Cebra, K. and Chen, S. (2008), A Calculation of the Theoretical Significance of Matched Bullets. Journal of Forensic Sciences, 53: 868–875

Conclusioni

La metodica impiegata ha dato prova di avere notevoli potenzialità.

Gli strumenti matematici, informatici e tecnologici impiegati si sono dimostrati molto efficaci e ripetibili.

Inoltre, si è pervenuti ad un giudizio comparativo affidabile e quantizzabile attraverso parametri quali-quantitativi statistici e non, che consentono anche di formulare un giudizio in termini di “qualificata probabilità”.

Lo studio ha anche messo in luce un fattore molto critico in ambito forense ad oggi non ancora superato: l’alta definizione delle immagini balistiche.

Le ragioni risiedono principalmente nel fatto che le immagini digitali non devono assolutamente essere “ritoccate” o essere sottoposte

a programmi di *image processing*, vale a dire non devono riportare artefatti.

Con le immagini analogiche gli artefatti praticamente erano impossibili da realizzare a meno di non ritoccare le pellicola fotografica, cosa davvero improbabile a causa della “traccia” che comunque ne sarebbe rimasta.

L’alta definizione è un *mix* di risoluzione, ingrandimento, indice di sfocatura e aberrazione cromatica.

Ad oggi non si è ancora riusciti a realizzare tecnologie capaci di massimizzare e bilanciare tali fattori.

Ricordiamo che le immagini digitali sono l’unico mezzo di interscambio tra le Polizie di tutto il mondo e materia di indagine dei periti balistici che non hanno accesso diretto ai reperti, come quelli delle parti.

Pertanto, scopo primario della presente ricerca è stata quella di pervenire, attraverso una metodica di facile impiego, a un giudizio identificativo quanto più oggettivo, pur con i limiti derivanti dalle immagini digitali.

Con gli attuali livelli di definizione delle immagini, la corrispondenza rilevabile fra microstriature di proiettili esplosi dalla stessa arma è prossima al 90%.

Un superamento degli attuali limiti è rappresentato dal possibile impiego di rugosimetri di nuova generazione, capaci di rilevare anche la terza dimensione (cioè l'altezza delle microstriature); a tal fine occorrono dimensioni del raggio laser dell'ordine di almeno 10^{-6} mm.

A ciò si deve aggiungere che per evitare il principale fattore di distorsione e di messa fuoco delle immagini ad alta definizione e ingrandimento occorrerebbe ricorrere a rilevatori ottici capaci di ruotare micrometricamente intorno al proiettile stesso.

In tal modo si potrebbero acquisire immagini non distorte e sempre messe a fuoco.

Infine, per validare la metodica proposta, è necessario implementare il campione dei proiettili sparati, nelle condizioni estreme: proiettili sparati in rapida sequenza con pistole aventi canne prodotte dallo stesso tubo.

APPENDICE

(estratto da: V. Niola, G. Quarenba – Elementi di dinamica non lineare dei sistemi meccanici per l'ingegneria. Dalla Trasformata Wavelet alla teoria del Chaos. Liguri Editore, 2011).

La Trasformata Wavelet

La parola *Wavelet*, "ondina" o "piccola onda", ha origine nei primi anni ottanta ed è dovuta a Morlet e Grossman che adoperarono la parola francese *ondelette* in analogia al fatto che essa realmente rappresentava una funzione a forma di piccola onda. Poco più tardi la parola originaria francese venne convertita in inglese, traducendo "onda" (*onde* in francese) in *wave* e ottenendo per sciarada la parola *wavelet*, per assonanza con la parola francese.

Lo sviluppo della teoria delle Wavelet, pur se ricollegabile a diverse correnti di pensiero, ha certamente avuto origine dal lavoro di Haar all'inizio del ventesimo secolo. Contributi importanti alla teoria delle Wavelet si possono attribuire alla formulazione, da parte di Goupillaud, Grossman e Morlet di quella che ora è nota come Trasformata Wavelet Continua (CWT, 1982), ai lavori preliminari di Strömberg sulle Wavelet discrete (DWT, 1983), alle Wavelet ortogonali a supporto compatto di Daubechies (1988), alla struttura a multirisoluzione di Mallat (1989), all'interpretazione in tempo-frequenza della CWT da parte di Delprat (1991), alla trasformata Wavelet armonica di Newland e molti altri ancora.

Il primo passo per comprendere compiutamente il senso e la tecnica legata alla trasformata Wavelet è quello relativo al concetto di scomposizione di un segnale o di una funzione.

Per introdurre questo concetto facciamo riferimento alla trasformata trigonometrica di Fourier. Essa può essere, da un punto di vista didattico, messa a confronto con la trasformata a mezzo wavelet.

Vedremo successivamente il sistema che meglio si presta a questo confronto, sia per evidenziarne le analogie e sia esaltare le specifiche differenze: quello che comunemente viene denominato sistema base di Haar. Esso consente di descrivere i concetti dell'analisi della multirisoluzione e di generalizzarli ad altri tipi di basi wavelet.

Il sistema base di Haar

L'estensione dall'analisi di Fourier all'analisi a mezzo Wavelet può avvenire attraverso lo studio della base costituita dalla cosiddetta funzione di Haar. Per la sua semplicità analitica, la funzione di Haar consente un approccio semplice e chiaro alle funzioni base costituite dalle Wavelet.

La funzione Haar è stata presentata nel 1910, quando ancora non si parlava di Wavelet. Essa è rappresentata in Fig. 34 ed è definibile come di seguito:

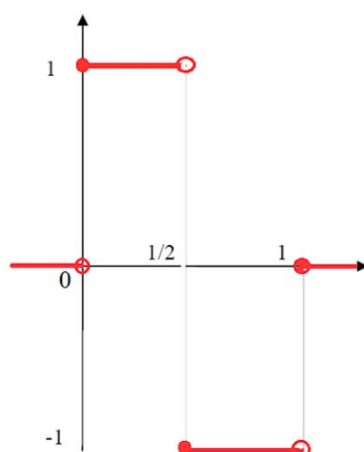


Fig. 34: Funzione Haar

$$y(x) := \begin{cases} 1, & 0 \leq x \leq \frac{1}{2} \\ -1, & \frac{1}{2} \leq x < 1 \\ 0, & x \notin [0, 1] \end{cases} \quad (1)$$

La funzione ψ di Haar definita in (1), comunemente viene denominata Wavelet "madre".

Essa "genera" intere famiglie di Wavelet per mezzo di due operazioni: dilatazione/compressione diadica e traslazione intera. Se indichiamo con " j " l'indice di dilatazione/compressione e con " k " l'indice di traslazione, la funzione **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** in forma parametrica, si scrive come

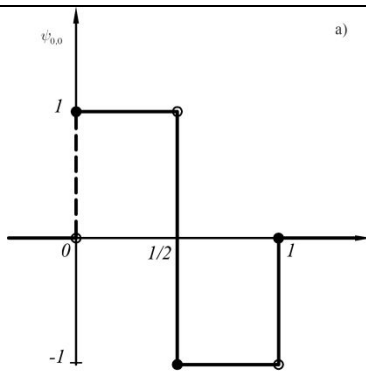
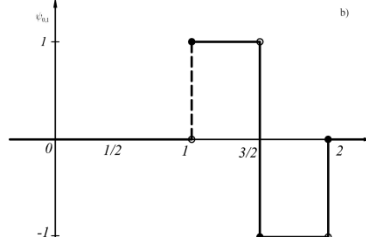
$$\psi_{j,k} = 2^{j/2} \psi(2^j x - k), \quad j, k \in \mathbb{Z}. \quad (2)$$

Da ora in avanti indicheremo, per brevità, indifferentemente con il termine Wavelet o funzione, la funzione di Haar sopra definita.

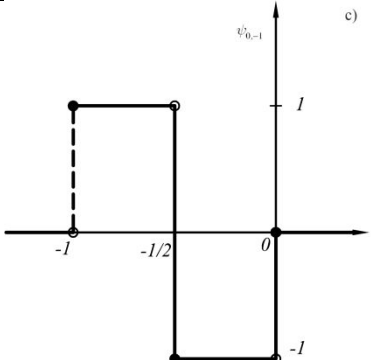
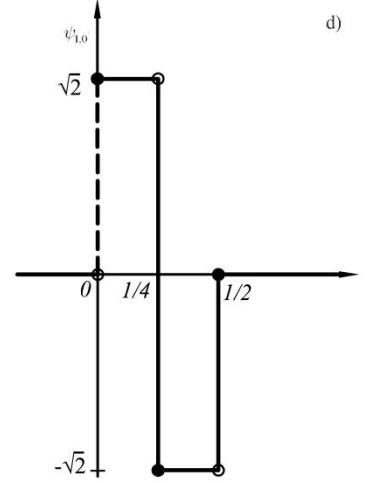
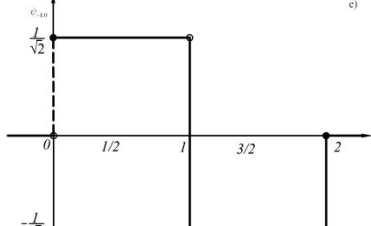
Analizziamo più in dettaglio il comportamento della (2) al variare di uno degli indici. In particolare nella Tab. 4 è rappresentato il comportamento della Wavelet al variare del parametro k , fissato $j = 0$. Notiamo che se k cresce, la Wavelet trasla verso destra Tab. 4b, viceversa al decrescere di k la funzione trasla verso sinistra Tab. 4c. In tale spostamento, la funzione rimane costante per quanto riguarda la forma. L'ampiezza del supporto⁵² è pari ad 1. Il supporto invece varia passando da $[0, 1]$ per $k = 0$, a $[1, 2]$ per $k = 1$ e $[-1, 0]$ per $k = -1$.

Il comportamento della funzione è quello di una compressione (*folding*) o di un allungamento (*stretching*) se, questa volta, proviamo a variare solo j . Poniamo il parametro $k = 0$ e poniamo $j = 1$ ovvero $j = -1$ rispettivamente. In questi ultimi casi l'ampiezza del supporto passa da 0.5 per $j = 1$ (Tab. 4d) a 2 per $j = -1$ (Tab. 4e). Il supporto varia da $[0, 0.5]$ a $[0, 2]$ rispettivamente per $j = 1$ e $j = -1$. Pertanto una combinazione dei due parametri j e k comporterà sia traslazioni che compressioni o allungamenti della funzione.

Tali proprietà risulteranno molto utili allorché si tratterà di utilizzare tale funzione come base per proiettare una qualsiasi altra funzione.

Funzione	Supporto	Amp. Supp.	
$\psi_{0,0}(x) = \psi(x)$	$[0, 1]$	1	
$\psi_{0,1}(x) = \psi(x-1)$	$[1, 2]$	1	

⁵² Ricordiamo brevemente che supporto di una funzione definita in $X \subseteq \mathbb{R}$ è l'intervallo in cui la funzione è diversa da zero: $\text{supp } f(x) := \{x \in X : f(x) \neq 0\}$.

$y_{0,-1}(x) = y(x+1)$	$[-1, 0)$	1	
$y_{1,0}(x) = \sqrt{2}y(2x)$	$\left[0, \frac{1}{2}\right)$	0.5	
$y_{-1,0}(x) = \frac{1}{\sqrt{2}}y\left(\frac{x}{2}\right)$	$[0, 2)$	2	

Tab. 4

Ricordando che ogni funzione di Haar soddisfa la condizione

$$\int_{-\infty}^{+\infty} y_{j,k}(x) dx = 0, \quad \forall j, k \in \mathbb{Z}$$

possiamo dimostrare il teorema che afferma che l'insieme $\{\psi_{j,k}, j, k \in \mathbb{Z}\}$ costituisce un sistema ortonormale completo in $L^2(\mathbb{R})$.

Per stabilire il risultato del teorema, è necessario mostrare che:

- L'insieme costituito da $\{\psi_{j,k}, j, k \in \mathbb{Z}\}$ è ortonormale;
- Ogni funzione $f \in L^2(\mathbb{R})$ può essere approssimata arbitrariamente bene tramite una combinazione lineare delle $\{\psi_{j,k}, j, k \in \mathbb{Z}\}$.

Per dimostrare la (a), facciamo ricorso alla definizione di funzioni ortogonali. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..** Notiamo preliminarmente che il supporto⁵³ della funzione Wavelet $\psi_{j,k}(x)$ è dato da:

⁵³ Ricordiamo che un sottoinsieme di \mathbb{R}^n è compatto se e solo se è chiuso e limitato.

$$\text{supp } y_{j,k}(x) = [k2^{-j}, (k+1)2^{-j}]$$

e che l'ampiezza dell'intervallo è pari a 2^{-j} .

Dall'analisi anche della Tab. 4 notiamo che due Wavelets aventi lo stesso indice j di dilatazione/compressione ma differenti valori di k non avranno mai un supporto che si sovrappone e perciò il loro prodotto scalare è nullo. Ne consegue che le funzioni sono ortogonali. Se due Wavelets hanno differenti indici j , diciamo $j < j'$ ma uguali valori di k , allora $\text{supp } y_{j,k}$ individua una regione in cui l'altra Wavelet è costante, così esse sono ancora ortogonali. Dal momento che

$$\|y_{j,k}\| = 1, \quad \forall j, k \in \mathbb{Z},$$

l'insieme è anche ortonormale.

Per meglio esemplificare quanto testè affermato vogliamo dimostrare, con riferimento alla Fig. 34a, la **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** Infatti abbiamo che, fissato j ,

$$(y_{0,0}, y_{0,1}) = \left(\begin{bmatrix} +1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ +1 \\ -1 \end{bmatrix} \right) = 0, \quad \forall k \in \mathbb{Z}.$$

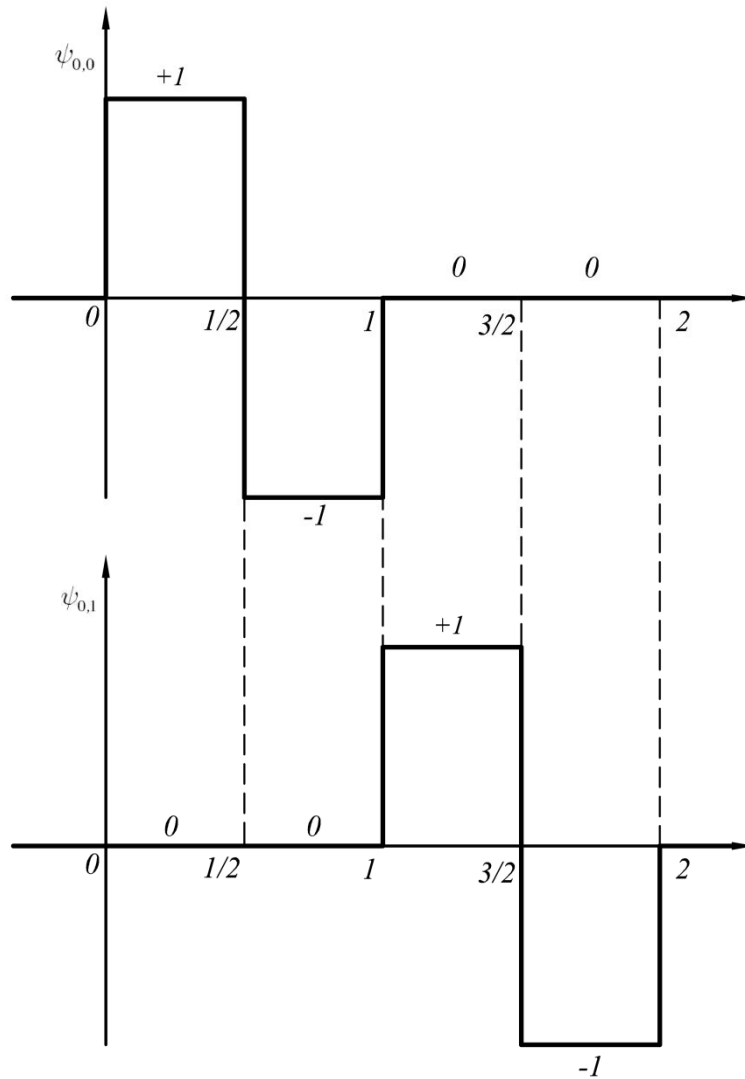


Fig. 35

Analogamente con riferimento alla Fig. 3.11b, dimostriamo la **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, fissato k ,

$$(y_{0,0}, y_{1,0}) = \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} +1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} +\sqrt{2} \\ -\sqrt{2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{pmatrix} = 0, \quad \forall j \in \mathbb{Z}$$

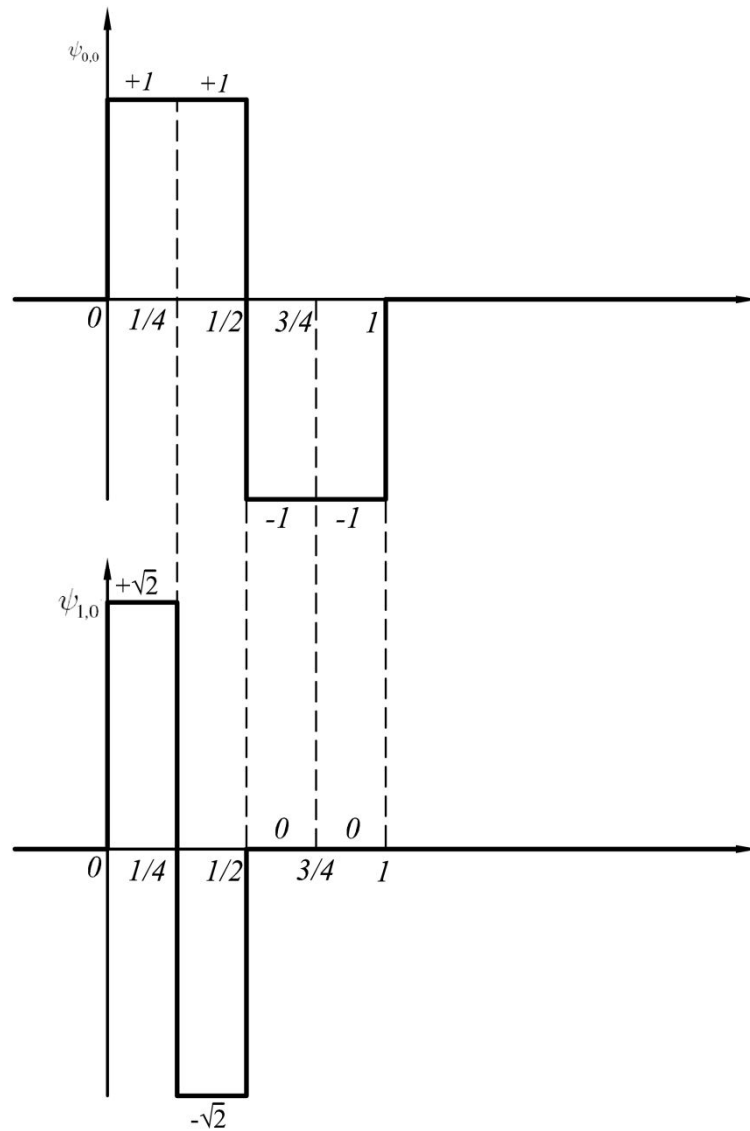


Fig. 36

Per dimostrare la (b), per prima cosa osserviamo che ogni funzione in $L^2(\Omega)$ può essere approssimata per mezzo di una funzione avente il supporto compatto. Poiché

$$\int_{-2^{J_1}}^{2^{J_1}} f^2(x) dx \rightarrow \int_{-\infty}^{\infty} f^2(x) dx$$

per $J_1 \rightarrow \infty$, possiamo approssimare f arbitrariamente bene in $L^2(\mathbb{R})$ scegliendo un intero J_1 opportunamente grande. Indichiamo con

$$f_{[-2^{J_1}, 2^{J_1}[}$$

la restrizione di f sull'intervallo

$$[-2^{J_1}, 2^{J_1}[.$$

Volendo generalizzare il problema ad un intervallo qualsiasi del tipo

$$[k2^{-J_0}, (k+1)2^{-J_0}[$$

possiamo fare riferimento ad una funzione continua a tratti su detti intervalli, avendo cura, però, di scegliere l'intero J_0 opportunamente grande, tanto da rendere l'approssimazione buona quanto si vuole.

Questa ricostruzione approssimata di una funzione per mezzo di una funzione continua a tratti è illustrata in Fig. 37.

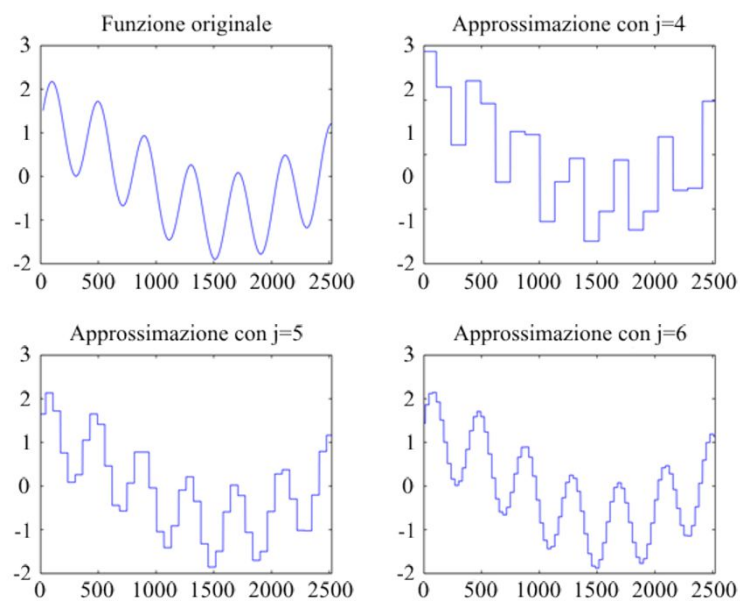


Fig. 37: - Ricostruzione di una funzione con una continua a tratti